

THÈSE

présentée devant
L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour obtenir le titre de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Joël HARDY

SUJET :

**Etude de la diffusion du sel
dans les fromages à pâte molle de type Camembert.
Comparaison du salage à sec et du salage en saumure.**

Soutenue publiquement le 9 avril 1976, devant la Commission d'Examen.

Membres du Jury :

Président : MM. A. VEILLET

Examineurs : M. METCHE
R. VEISSEYRE
F. WEBER



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555016_0032

THÈSE

PRÉSENTÉE

À L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD

PAR M. J. J. J. J.

DOCTEUR EN SCIENCES

DE LA VITICULTURE

1981

Étude de la diffusion du sel

dans les fromages à pâte molle de type Camembert

Comparaison du salage à sec et du salage en saumure

Revue publiée sous le patronage de la Faculté de Médecine de l'Université de Nancy

Présentée par M. J. J. J. J.

Président : M. J. J. J. J.

et M. J. J. J. J.

Atelier de Reliure

Pierre Oudart

11, Rue Sainte-Anne, 11

Tél. 20.49.82 - NANCY

THÈSE

présentée devant
L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour obtenir le titre de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Joël HARDY

SUJET :

**Etude de la diffusion du sel
dans les fromages à pâte molle de type Camembert.
Comparaison du salage à sec et du salage en saumure.**

Soutenue publiquement le 9 avril 1976, devant la Commission d'Examen.

Membres du Jury :

Président : MM. A. VEILLET

Examineurs : M. METCHE
R. VEISSEYRE
F. WEBER



AVANT-PROPOS

Avant d'exposer notre travail, nous tenons à présenter à Monsieur le Professeur VEILLET, Professeur de Biologie Animale à l'Université de Nancy I, qui nous a fait le grand honneur d'accepter la présidence de notre Jury de thèse, l'expression de notre gratitude et de notre respect.

A Monsieur le Professeur WEBER, responsable du service de Technologie Laitière à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires qui a inspiré et dirigé ce travail nous exprimons notre plus sincère reconnaissance.

Nous assurons de toute notre gratitude, Monsieur le Professeur METCHE, responsable du Service de Biochimie à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, qui nous a fait l'honneur de faire partie de notre Jury.

Que Monsieur le Professeur VEISSEYRE, Professeur d'Industries Agricoles et Alimentaires à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon qui a accepté de faire partie de notre Jury, trouve ici l'expression de notre plus sincère reconnaissance.

Nos remerciements vont également :

A la Société Solvay en la personne de Monsieur DESAVELLE qui nous a aidé matériellement dans la réalisation de nos travaux.

A nos camarades et collègues du Laboratoire de Technologie Laitière, du Laboratoire de Bactériologie Alimentaire et du Laboratoire de Chimie Laitière, qui par leurs conseils et leurs encouragements ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de cette étude.

ETUDE DE LA DIFFUSION DU SEL DANS LES FROMAGES A PATE MOLLE DE TYPE
CAMEMBERT - COMPARAISON DU SALAGE A SEC ET DU SALAGE EN SAUMURE

	PAGES
I - <u>INTRODUCTION</u>	1
II - <u>MATERIELS ET METHODES</u>	15
2.1. Fabrication des fromages	15
2.2. Salage des fromages	16
2.2.1. Salage en saumure	16
2.2.1.1. Etude de l'évolution chimique des saumures	16
2.2.1.2. Etude de l'influence de l'agitation..	17
2.2.1.3. Etude de l'influence de la tempéra- ture du pH et de la concentration....	19
2.2.1.4. Etude de l'influence du "vieillis- sement"	20
2.2.1.5. Etude de la diffusion du sel	20
2.2.2. Salage à sec	21
2.3. Affinage des fromages	21
2.4. Sélection des fromages	22
2.5. Méthodes de découpage des fromages	25
2.5.1. Calcul des coefficients de diffusion :	
Méthode A	25

2.5.2.	Cinétique de diffusion du sel après salage : Méthode B	29
2.5.3.	Précision des méthodes de dé- coupage	29
2.5.3.1.	Méthode A	29
2.5.3.2.	Méthode B	31
2.5.3.2.1.	Variation des dimensions avant salage	31
2.5.3.2.2.	Variation des dimensions pendant l'affinage	31
2.6.	Répartition de l'eau avant salage	33
2.7.	Méthodes analytiques	33
2.7.1.	Analyse chimique des saumures	33
2.7.1.1.	Acidité et pH	34
2.7.1.2.	Dosage des chlorures	34
2.7.1.3.	Dosage des matières azotées	35
2.7.1.4.	Dosage des minéraux	36
2.7.2.	Analyse physico-chimique des fromages ..	36
2.7.2.1.	Matières sèches et matières grasses	36
2.7.2.2.	Dosage des chlorures	36
2.7.2.3.	Méthode de mesure de la protéolyse	37

III - <u>RESULTATS ET DISCUSSION</u>	38
3.1. Influence de la composition des saumures sur le salage et l'affinage	38
3.1.1. Evolution chimique des saumures	38
3.1.2. Influence de diverses caractéris- tiques de la saumure	48
3.1.2.1. Influence de la température	48
3.1.2.2. Influence du pH de la saumure ...	50
3.1.2.3. Influence de la concentration de la saumure	50
3.1.2.4. Influence du vieillissement de la saumure	53
3.1.2.5. Influence de l'agitation	55
3.1.3. Discussion	57
3.2. Salage par saumurage	61
3.2.1. Calcul du coefficient de diffusion du sel dans l'eau du fromage	61
3.2.2. Influence de la texture	69
3.2.3. Influence de la répartition initiale de l'humidité	71
3.2.3.1. Diffusion verticale	71
3.2.3.2. Diffusion horizontale	73
3.2.4. Niveau de pénétration du sel en fin de saumurage	77
3.2.5. Influence de la durée de saumurage sur l'absorption de sel par le froma- ge entier	77

3.2.6.	Perte d'humidité en fin de saumu-	
	rage	88
3.2.7.	Discussion	90
3.3.	Migration du sel et de l'eau dans le fromage	
	pendant l'affinage	93
3.3.1.	Migration après salage par saumurage ..	93
3.3.1.1.	Cinétique de migration du sel ...	93
3.3.1.1.1.	Equilibre vertical	99
3.3.1.1.2.	Equilibre horizontal	100
3.3.1.1.3.	Importance de l'absorption	
	de sel par les différentes	
	surfaces.....	103
3.3.1.2.	Migration de l'eau après saumurage	104
3.3.2.	Migration après salage à sec	104
3.3.2.1.	Absorption de NaCl par application	
	de sel sec	107
3.3.2.2.	Cinétique de migration du sel -	
	Comparaison avec le salage en	
	saumure	107
IV -	<u>CONCLUSION</u>	113
V -	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	118
VI -	<u>ADDITIF ET ANNEXES</u>	135

ABREVIATIONS UTILISEES

A°D	acidité Dornic
C	concentration en sel de la saumure
c	concentration en sel du fromage
co	concentration initiale en sel du fromage
Dh	coefficient de diffusion horizontale
Dm	coefficient de diffusion moyen
Dv	coefficient de diffusion verticale
EST	extrait sec total
Ev	équilibre vertical
G/S	gras sur sec
h	épaisseur du fromage
H %	humidité du fromage
Mh	migration horizontale
M _t	quantité de sel ayant diffusé (%.cm)
NPN	azote non protéique
NS	azote soluble
NT	azote total
r	coefficient de corrélation
R max	rayon du fromage
S	taux de sel moyen du fromage entier
Sp	surface spécifique du fromage
t	durée de saumurage
ΔE	perte d'eau du fromage
ΔS	gain de sel du fromage
σ	écart-type
σ c	surface cylindrique
σ p	surface plane
σ T	surface totale.

I -INTRODUCTION

De tout temps, le sel ou chlorure de sodium a joué un rôle considérable dans l'alimentation de l'homme tant pour la préparation que pour la conservation des aliments. C'est un composant de tous les systèmes protoplasmiques et donc un élément indispensable à la vie.

Beaucoup de produits alimentaires sont des sources de sodium pour l'organisme humain, soit parce qu'ils en contiennent naturellement, soit en raison du salage supplémentaire qu'on leur fait subir pour les conserver ou pour améliorer leur goût.

Aussi, de nombreux nutritionnistes font-ils, actuellement, remarquer que l'homme a tendance à ingérer des quantités de plus en plus importantes de sodium, beaucoup plus, semble-t-il, en raison d'habitudes alimentaires qu'en vertu d'un besoin physiologique réel (41). Le tableau 1 montre, effectivement, la grande variété des concentrations en sel rencontrées dans des fromages de diverses origines géographiques. Toutefois, si, dans ce cas, l'habitude joue un rôle évident, il ne faut pas, non plus, mésestimer la nécessité, pour certaines régions au climat chaud, de tout mettre en oeuvre pour conserver un produit alimentaire particulièrement dégradable.

Tableau 1

TENEUR EN CHLORURE DE SODIUM DE QUELQUES FROMAGES

(d'après MAIR-WALDBURG)
(88)

Alpigo (D)	1,9	Jarlsberg (N)	1,3
Asiago doux (I)	1,9	Jéromé (A)	1,6
Asiago piquant (I)	2,9	Kaschkawal (YU)	3-5
Beaumont (F)	2,0	Kefalotiry (GR)	3-6
Beyaz Peynir (TR)	3-7	Langres (F)	3,2
Bijeni Sir (YU)	5-8	Livarot (F)	2,5
Bjalo (BG)	8-10	Manchego (E)	1,5-2
Boulette d'Avesnes		Maribo (DK)	1,5-2
(F)	2,7	Mimolette (F)	1,5-2,5
Brick Cheese (USA)	1,9	Moldavian (SU)	3,5
Burgos (E)	2,5-3	Morbier (F)	1,6
Caciocavallo (I)	1,5-2	Munster (F)	2,7
Camembert (F)	2-3	Neufchâtel (F)	2
Carré de l'Est (F)	2-3	Njeguski (YU)	3-3,5
Ceçil (SU)	4-8	Numidia (TN)	3,2
Chaource (F)	2	Olivet (F)	2,7
Cheddar (USA)	1,8	Ostiepok (CS)	3-3,5
Chester (D)	1,5	Otlwan (TR)	5-14,5
Cottage cheese (USA)	1	Pecorino Romano (I)	5-7
Danablu (DK)	3-5	Pont l'Evêque (F)	2,1-2,9
Danbo (DK)	1-1,5	Reblochon (F)	1,7
Danni (ET)	6	Roquefort (F)	4,1-5
Edam (NL)	1,7-1,8	St Nectaire (F)	1,8-2,3
Emmental (CH)	1	St Paulin (F)	1,5-2,5
Feta (GR)	2,4-4,4	Samsoe (DK)	1,5
Fontal (I)	1,5	Sbrinz (CH)	2
Fontina (I)	2	Stilton (G.B.)	1,5
Fourme d'Ambert (F)	2	Telemea (R)	3,5
Gammelost (N)	0,2	Tilsit (D)	2
Gorgonzola (I)	2,2	Trapist (YU)	1,5-2
Gouda (NL)	1,8	Tulum (TR)	1,6-10
Gruyère (F)	1,6	Vacherin (CH)	1,7
Havarti (DK)	1-2	Vologda (SU)	3-5
		Wensleydale (GB)	1,7-2

Dès lors, le maintien du fromage dans un milieu salé (saumure généralement) pendant de longues périodes devient pratique courante et explique les taux remarquablement élevés de certains produits.

Ces remarques nous conduisent à mettre en évidence le triple rôle du sel dans l'importante phase de la fromagerie qu'est le salage :

a) Le sel complète l'égouttage du fromage en raison de son hygroscopicité qui provoque un drainage supplémentaire du lactosérum contenu dans la pâte. S'il s'agit de salage en saumure, c'est la forte pression osmotique de la solution salée qui produit cet égouttage. De plus, le chlorure de sodium intervient sur l'état d'hydratation des protéines (102). Ce séchage accru du fromage et cette modification de la caséine contribuent à la formation de la croûte.

b) Le sel, par ses propriétés antiseptiques ou bactériostatiques, influence, en premier lieu, le développement des microorganismes de la surface du fromage et, secondairement, par diffusion dans les couches profondes, les microorganismes de l'intérieur du fromage (68). Il joue également un rôle sur l'activité des enzymes de la pâte et, de ce fait, agit sur la phase d'affinage dans son ensemble (70).

c) Le sel enfin, s'il apporte son goût salé caractéristique a aussi la propriété d'exalter ou de masquer la sapidité de certaines substances apparaissant au cours de la maturation du fromage (134). Il a donc un rôle important dans la qualité organoleptique du produit.

Diverses méthodes sont utilisées pour saler le fromage (107) :

- salage à sec, à la main, à l'aide d'une passoire ou d'une machine

permettant de coller au fromage la quantité de sel désirée ;

- salage en saumure, utilisé de préférence au salage à sec pour la plupart des fromages à pâte pressée ;
- salage dans la masse du caillé avant moulage utilisé pour quelques types de fromages (Cantal, Cheddar). Des essais d'application de cette technique ont, également, été effectués pour l'Emmental (25,49), le Gouda (75), le Kaschkawal (39), les fromages à pâte persillée (81), mais n'ont pas toujours abouti à des résultats intéressants ;
- dissolution du sel dans le lait, méthode utilisée pour quelques types de fromages artisanaux fabriqués au Proche-Orient. Des expériences avec cette méthode ont été réalisées dans le cas de fabrications d'Emmental (25) mais n'ont pu être appliquées industriellement en raison d'une part de l'influence du NaCl sur les temps de coagulation par la présure, sur la fermeté du coagulum et sur le développement des bactéries lactiques, et d'autre part des importantes pertes de sel dans le sérum.

Actuellement, le salage en saumure se répand de plus en plus ; il est utilisé couramment pour le salage des fromages à pâte pressée, mais aussi, très souvent, pour le salage des pâtes molles (14). Il semble, également, que le saumurage des fromages à pâte persillée, traditionnellement salés à sec, soit possible (101, 135).

En France, c'est vers 1925 que les premiers essais publiés de salage en saumure des fromages à pâte molle ont été réalisés (137). A la lecture des résultats particulièrement favorables, on aurait pu penser que, très rapidement, cette technique serait adoptée par le plus grand nombre de fabricants, car ses avantages sont considérables :

- salage plus régulier d'un fromage à l'autre
- diminution de la main d'oeuvre

- possibilité de travail en continu

Pourtant, de nos jours, les adeptes du salage à sec pour les fromages à pâte molle restent nombreux, ayant comme argument principal une meilleure qualité organoleptique du produit au stade de la commercialisation et une plus faible fréquence dans l'apparition des défauts de surface.

Aussi, l'objectif de notre travail a-t-il été de connaître l'influence de la technique de salage sur la cinétique de diffusion du sel dans les fromages à pâte molle de type Camembert avec son incidence sur la qualité du produit .

De nombreux travaux ont été consacrés aux problèmes relevant du salage des fromages. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories :

- travaux concernant la qualité des sels, leur amélioration et leur influence sur le développement des microorganismes du fromage ou sur les réactions enzymatiques

- travaux ayant pour but d'optimiser le procédé de salage d'un fromage déterminé

- travaux destinés à la connaissance du mécanisme de pénétration du sel.

a) Dans la première catégorie, on peut ranger les études concernant la composition physico-chimique et microbiologique des sels de fromagerie. Ainsi, CLAYTON (18, 19) RAMSAY (114), VIARD (139) indiquent quelle devrait être la composition idéale d'un sel utilisé en fromagerie et insistent particulièrement sur la nécessité de le débarrasser du magnésium et des sulfates qui risquent de donner des saveurs amères.

MOESTLER et WEGMULLER (74) montrent que la présence d'iode dans le sel ne fait pas varier la qualité organoleptique du fromage. BRYANT (10), KIEFERLE et SONNLEITNER (66) se sont plus particulièrement attachés à étudier l'influence de la granulométrie des sels de salage à sec sur le degré de salage et d'égouttage du fromage, montrant qu'en utilisant du sel fin, l'évacuation du sérum pendant le salage est beaucoup plus rapide.

La composition des saumures a été étudiée par AGAGABYAN et SAAKYAN (1) qui ont montré que l'addition d'oligo-éléments accélère l'affinage des fromages en saumure sans altérer leur qualité. GEURTS (36), KYURKCHYAN (79), SOLLBERGER (125), de VRIES (141) trouvent que l'adjonction limitée de calcium dans les saumures de pâte pressée améliore la formation de la croûte du fromage. L'acidification des saumures a été étudiée pour divers fromages et permet d'éviter des défauts de croûte ou des développements de microorganismes (63, 64, 136, 150).

Le vieillissement des saumures pendant leur utilisation a fait l'objet d'études particulières (44, 80) et KEILLING (62) a mis en évidence, dans le cas des fromages à pâte cuite, la diminution progressive de la concentration en sel et l'élévation de la concentration en constituants provenant du lactosérum. KURMANN (78) indique que la saumure devrait être contrôlée périodiquement afin de mieux connaître son degré de vieillissement qui, selon divers auteurs (51, 62, 79), ralentit les échanges entre le fromage et la solution salée.

Le taux de concentration en sel de la saumure a été étudié sous divers aspects. Si les hautes concentrations permettent de diminuer la durée du salage (7, 24, 37, 90, 98, 104), elles réduisent aussi les risques de contamination des saumures par divers microorganismes (15, 17, 58, 110, 127).

La composition microbiologique des sels et saumures de fromagerie a également fait l'objet de nombreux travaux. CLAYTON (19) indique que l'origine et le mode de fabrication des sels ont une influence sur leur charac-

microbienne. Les sels obtenus par évaporation sous vide (16) sont stériles. Par contre, GROSSERON (42) contrôle des sels marins et montre qu'ils peuvent être fortement chargés en microorganismes divers. CENTELEGHE (15) confirme ces résultats en étudiant l'origine des microorganismes qu'il isole à partir des saumures industrielles. Il étudie, par ailleurs, les possibilités de survie de ces germes dans les solutions salées et démontre qu'il existe une corrélation entre la teneur en germes de la saumure et sa concentration en sel. Il souhaite, alors, que, dans la pratique, il soit utilisé des saumures saturées afin de réduire la survie de ces microorganismes. Auparavant, GORINI (40) avait montré que les saumures utilisées dans les laiteries étaient souvent chargées en germes et pouvaient être responsables d'accidents de fabrication dont l'origine est expliquée par d'autres auteurs (48, 58, 63, 82, 127). Ce problème n'est pas particulier aux saumures de fromagerie et est étudié par INGRAM (50) dans le cas des saumures de charcuterie.

Cette charge microbienne des saumures a conduit certains auteurs à envisager des traitements pour détruire ces microorganismes : adjonction d'eau oxygénée (4, 46, 104), d'hypochlorite de sodium (4, 32, 104), d'iode (4), d'acide sorbique (6), traitement aux rayons ultraviolets (12). Les traitements par la chaleur suivis d'une filtration ont le même but et présentent, en plus, l'avantage d'éliminer une partie des substances azotées qui seraient susceptibles de favoriser le développement des microorganismes (80, 140). Les techniques de saumurage dynamique (72, 126) vont dans le même sens en cherchant à obtenir une concentration élevée et constante pendant toute l'opération de saumurage.

Dans cette première catégorie de travaux, on peut ranger également les travaux effectués à l'Ecole de Laiterie de Nancy, concernant l'influence du sel sur le développement des moisissures superficielles du Camembert (138). MASSON (93) étudie le développement de *Penicillium glaucum* capable de causer des contaminations lors de l'affinage des pâtes molles. MENDEZ (97) montre que la qualité du sel joue un rôle important sur la croissance de *Penicillium candidum*. Ces travaux ont conduit

à la préparation de sels spéciaux capables de favoriser le développement de la moisissure blanche (94).

JACQUET et coll. (53) étudient également l'influence du pH et du sel sur le développement de diverses souches de *Penicillium candidum* et citent les travaux de SANSONNETTI qui montre que le sel inhibe partiellement l'activité des levures, *Torula* et surtout *Geotrichum* dont le développement est arrêté complètement à 6 % de sel alors que *Penicillium candidum* peut supporter jusqu'à 20 % de sel.

Les interactions pH-NaCl sont importantes dans l'étude du développement des *Penicillia*, mais il faut y ajouter l'effet de l'humidité superficielle du fromage.

Ainsi, KUNDRAT (77) s'intéressant également au Camembert, montre qu'une croissance défectueuse des moisissures est due à une humidité élevée dans le hâloir et à un développement excessif de levures. D'autres auteurs, encore, ont étudié le pouvoir de germination des *Penicillia* (27, 119) en fonction de la concentration en sel du substrat et estiment que les spores de *Penicillium candidum* devraient être germées avant que le salage soit effectué.

L'influence du sel sur les bactéries lactiques a été étudiée par MALOUCHKO (89) qui indique que le sel, à faible dose, favoriserait le développement des ferments lactiques en inhibant la flore gazéifiante. CLAYTON (19) constate que les bactéries lactiques sont détruites entre 5 et 10 % de sel alors que les levures sont au contraire très tolérantes. MARTLEY et LAWRENCE (92) trouvent, quant à eux, une très grande diversité dans la résistance au sel des bactéries lactiques, selon les souches. KIKUCHI (71, 72) étudiant la flore du Camembert montre que lorsque le taux de NaCl est faible dans le fromage, les bactéries lactiques originaires des levains sont dominantes ; par contre, lorsque le taux de sel augmente, *Leuconostoc dextranicum* devient dominant.

Beaucoup d'autres types de microorganismes ont été étudiés sous l'aspect de leur sensibilité au sel : nous citerons la haute tolérance au sel des bactéries du genre *Lactobacillus* couramment décelées dans les saumures (50), celles du genre *Staphylococcus* étudiées par CENTELEGHE (15) et la résistance au sel de certains *Clostridia* étudiés pour leur importance particulière dans les fromages à pâte cuite où ils produisent l'accident dit "gonflement tardif" (34, 58, 61).

b) Dans la deuxième catégorie on peut situer un certain nombre de travaux destinés à améliorer les procédés de salage où à déterminer les taux de sel souhaitables dans divers fromages.

Beaucoup de ces travaux concernent le Cheddar. Ainsi, DAWSON (22) étudie l'influence d'un salage extérieur supplémentaire qui abaisse le taux d'humidité sans affecter la qualité organoleptique. MARQUARDT (91) estime que le taux de sel dans ce fromage ne devrait jamais être inférieur à 1,5 % de sel alors que IRVINE et JARDINE (52) regroupant des résultats sur plusieurs années montrent que les taux de sel moyens ont plutôt tendance à diminuer et sont parfois inférieurs à ce taux. RIDDET et coll. (116) montrent les inconvénients d'un salage trop faible ou trop fort sur la qualité organoleptique. SUTHERLAND (131) étudie l'influence de divers paramètres, tels que le taux de sel ajouté, la température du caillé, l'humidité de celui-ci, sur l'absorption de sel et l'égouttage du Cheddar. BREENE et coll. (8) comparent le salage à sec et le salage par saumurage du caillé et ne trouvent pas de différences caractéristiques.

Concernant l'Emmental, MAIR-WALDBURG et HEINRICH (86) et MAIR-WALDBURG et HEFELE (87) émettent un avis identique à celui de MARQUARDT (91), à savoir que le taux de sel ne devrait pas être inférieur à 4,9 % dans l'eau du fromage pour éviter les goûts amers. SCHULZ et KAY (121), OLSANSKY et coll. (105) préconisent aussi des taux de sel de cet ordre.

On trouve également d'autres résultats concernant la recherche de conditions optimales pour le salage de divers fromages (2, 3, 24, 76, 103, 104, 108, 115, 118, 123, 130), mais le Camembert ne semble pas avoir fait l'objet de recherches dans ce domaine.

c) La troisième catégorie concerne des travaux ayant pour but la connaissance des mécanismes intimes de la diffusion du sel. Ils sont, pour la plupart, orientés sur l'étude de la migration du sel pendant l'opération de saumurage et ont été généralement effectués sur des fromages à pâte pressée.

Certains de ces travaux ont abouti à la formulation d'expressions mathématiques permettant de calculer la quantité de sel ayant pénétré dans le fromage au bout d'un temps déterminé : travaux de JAKUBOWSKI (55, 56, 57), de VUJICIC (143, 144, 145, 146), de ZONJI (151, 152). Les expressions obtenues restent toutefois limitées à des fromages saumurés pendant de longues périodes et sont difficilement transposables à d'autres types. Ainsi, VUJICIC calcule le coefficient de diffusion dans la pâte et trouve des valeurs voisines de $0,072 \text{ cm}^2/\text{j}$; cette valeur ne peut guère être utilisée en dehors du fromage étudié (Kaschkawal) car les taux de matières grasses et de matières sèches ne sont pas connus. Toutefois, il démontre l'influence de la température sur la diffusion du sel.

ZONJI, utilise, dans les expressions qu'il obtient, la valeur du coefficient de diffusion du sel dans l'eau pure ($1,20 \text{ cm}^2/\text{j}$) ce qui, comme l'indique KIRCHMEIER (71), n'est pas exact. Pour ce dernier, le coefficient de diffusion du sel dans l'eau du fromage, qu'il assimile à une membrane poreuse, est obligatoirement inférieur au coefficient de diffusion dans l'eau pure. Partant des lois de l'écoulement dans les systèmes capillaires, il détermine un coefficient de perméabilité au sel du Camembert $k' = 0,18 \text{ cm}^2/\text{j}$. Ce coefficient correspond au coefficient de "pseudo-diffusion" D^* que GEURTS (37, 38) définit comme étant

représentatif de la diffusion du sel dans l'eau du fromage. Etudiant particulièrement des fromages à pâte pressée (Gouda), il démontre que ce coefficient D^* est largement influencé par les taux de matières sèches et de matières grasses du produit et par la température de saumurage. Le pH du fromage et la concentration de la saumure ont un effet moindre. Il généralise aux autres types de fromage et donne une abaque permettant de prévoir la valeur de D^* en fonction du taux d'humidité du fromage et de son gras sur sec.

Il étudie également la migration de l'eau pendant le saumurage et montre qu'il existe un rapport constant entre la prise de sel et la perte d'eau, le rapport étant voisin de 2,5. A partir de résultats obtenus par BYERS et PRICE (11) pour du "Brick", il calcule que ce rapport serait de 2,3 et conclut que la sortie de l'eau est une conséquence directe du processus de diffusion : l'eau ne se déplace pas en raison d'une contraction du fromage lorsqu'il est placé dans la saumure, mais, au contraire, la réduction de volume est due au bilan de la pénétration de sel et de la perte d'eau.

La migration du sel après salage a fait l'objet d'un certain nombre de travaux ayant pour but de connaître la répartition du sel dans les différentes parties du fromage à un moment déterminé de l'affinage. DOLEZALEK et RADL (24) ont montré que dans des fromages de Moravie, les couches internes ne contiennent pas de sel lorsque l'affinage commence. La migration qui s'effectue pendant la maturation est affectée par la température et après 50 jours d'affinage l'équilibre n'est pas encore atteint. SCHULTZ et coll. (122), FUTSCHIK (33) étudient les allures de diffusion après salage du Tilsit et trouvent que l'équilibre des concentrations en sel intervient après 8 semaines d'affinage environ. JULSKJAER (60) obtient des durées identiques pour le Fynbo, le Havarti et le Samsø et remarque que des problèmes d'échantillonnage se posent lorsque l'équilibre n'est pas atteint. Pour le Brick (11) et l'Emmental (86), les durées pour atteindre l'équilibre sont respectivement 8 semaines et 4 mois.

Pour le Camembert, KIEFERLE et SEYRER-REINDL (67) estiment qu'en 7 à 10 jours l'équilibre des taux de sel est atteint. KIEFERLE et SONNLEITNER (66) étudient aussi la diffusion du sel après salage à sec du Camembert et montrent que l'équilibre des concentrations s'obtient après un temps assez long alors que par diffusion verticale il est obtenu beaucoup plus rapidement (un jour). Des valeurs existent pour d'autres types de fromages : Pecorino Romano (108), Niva (73), Cheddar salé en saumure (95) ou salé dans la masse (96) et montrent toutes la lenteur du processus de migration du sel après salage.

Par contre, rares sont les travaux effectués sur l'équilibre des concentrations en eau pendant la période d'affinage. On peut citer, toutefois, l'étude de SCOTT (124), effectuée sur le Cheddar, qui montre que la perte d'humidité pendant l'affinage dépend du mouvement de l'eau dans le fromage et que la température influence la diffusion de l'humidité. HOECKER et HAMMER (47) montrent qu'après 4 mois d'affinage la distribution de l'humidité et du sel dans le Cheddar n'est encore pas homogène.

Pour compléter cette revue bibliographique des recherches effectuées sur le salage des fromages, il convient de citer les études sur la migration des ions Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ . Ainsi SWIATEK et JAWORSKI (132) utilisent le microscope électronique pour déterminer la distribution des minéraux dans la pâte. JAKUBOWSKI et REPS (56) observent des pertes de substances minérales d'environ 10 % pendant le saumurage. Ils remarquent, en outre, que le sodium pénétrant dans le fromage se fixe partiellement sur le complexe de paracaséinate par échange avec le calcium, mais qu'il est ensuite de nouveau déplacé par les ions H^+ . KIRCHMEIER (71), assimilant le fromage à une membrane, montre que cette membrane n'est pas entièrement passive et que des phénomènes d'échange, qui perturbent la diffusion du sel, interviennent. Le coefficient de "pseudo-diffusion" de GEURTS (37) englobe, d'ailleurs, ce phénomène parallèle. Enfin, VUJICIC (142) montre que la variation, pendant le salage, du contenu en matières minérales, autres que le sel, du fromage Kaschkawal est en relation

directe avec la variation du contenu en matières sèches.

L'ensemble des travaux concernant le salage des fromages nous conduit donc aux conclusions suivantes :

- les rares études concernant le salage du Camembert n'apportent pas d'éléments de comparaison entre les deux systèmes de salage utilisés pour ce produit : salage en saumure, salage à sec
- l'influence de la composition des saumures et les effets de son agitation sont mal connus pour ce type de fromage
- le mécanisme du salage, s'il a été étudié sur des fromages à pâte pressée restant en contact avec la saumure pendant une longue durée, n'a pas fait l'objet de vérifications expérimentales dans le cas des fromages à pâte molle qui n'ont pas l'homogénéité des fromages à pâte pressée.

En conséquence, dans la première partie de notre étude, nous essaierons de connaître l'influence de divers paramètres propres à la saumure sur le salage et l'affinage des fromages de type Camembert.

Dans la deuxième partie, nous aborderons le mécanisme de la diffusion du sel pendant le saumurage en insistant particulièrement sur l'influence de l'hétérogénéité du produit. La diffusion du sel s'effectuant dans l'eau du fromage, nous étudierons également la migration de l'eau pendant le processus de saumurage.

Nous consacrerons la troisième partie à l'évolution des concentrations en sel et en eau dans les différentes parties du fromage pendant l'affinage en nous attachant spécialement à comparer les deux techniques de salage sous cet aspect.

Nous concluerons en exposant les principaux phénomènes d'ordre microbiologique ou enzymatique qui peuvent être consécutifs aux différentes allures de migration du sel et qui sont susceptibles d'entraîner des modifications de la qualité du produit.

II - MATERIELS ET METHODES

2.1. FABRICATION DES FROMAGES

Pour les besoins de notre étude, nous avons utilisé des fromages à pâte molle de type Camembert, fabriqués à partir de lait pasteurisé à 72° C pendant 15 secondes et standardisé à 26 grammes par litre de matières grasses de façon à obtenir un gras sur sec (G/S) de 45 %.

La technique de fabrication utilisée est le procédé traditionnel de coagulation en bassines de 100 litres. Le lait est maintenu à 35°C etensemencé en ferments lactiques à la dose de 2 %. On lui ajoute du chlorure de calcium à la dose de 10 g pour 100 litres de lait de fabrication.

L'emprésurage est effectué à l'aide de présure animale (force 10 000) à raison de 22 ml pour 100 l de lait. Après un temps de floculation d'environ 15 minutes, on laisse le coagulum se raffermir pendant 60 minutes. On procède ensuite au tranchage du caillé en cubes d'environ 2 cm de côté.

Le caillé est laissé au repos sous le sérum pendant 30 minutes avant le moulage qui s'effectue à l'aide d'un répartiteur de caillé (multi-moules) dans des moules cylindriques, d'une hauteur de 130 mm et d'un diamètre intérieur de 110 mm. Après un égouttage de 20 heures, à température et hygrométrie contrôlées, les fromages sont démoulés et salés.

2.2. SALAGE DES FROMAGES

2.2.1. Salage en saumure

2.2.1.1. Etude de l'évolution chimique des saumures

Les saumures utilisées ont été préparées à partir de sel SOLVAY super-épuré, super-désulfaté dont la composition est la suivante :

Humidité	: 0,2 %
Matières insolubles	: 0 %
Sulfates (SO_4^{2-})	: 0,016 %
Ca (%)	: 0,0021 %
Mg	: 0,0008 %
NaCl (% du produit sec)	: 99,99 %

Le saumurage des fromages fabriqués industriellement selon la technique décrite précédemment est effectué dans des bacs contenant 1000 litres de saumure à une concentration en sel voisine de la saturation (300 à 320 g de sel par litre de saumure).

Le nombre de fromages saumurés par jour, dans l'usine où ils ont été fabriqués, est d'environ 4000 pour chacun des bacs.

L'étude de l'évolution de la composition physico -

chimique des saumures a été effectuée sur deux bacs de saumurage :

- un bac dans lequel la saumure ne subit aucune agitation particulière : saumure dite "statique"
- un bac dans lequel la saumure est agitée, pendant les opérations de saumurage, par circulation au moyen d'une pompe qui réintroduit, à l'aide de rampes percées de trous placées dans le fond du bac, la saumure qui déborde de ce bac. Entre la goulotte de débordement et la pompe est placé un filtre destiné à retenir les particules du fromage. Les rampes sont recouvertes par un lit de sel et le débit de la pompe est ajusté pour éviter tout entraînement. (figure 1). Dans ces conditions, la saumure est débarrassée en permanence des plus grosses impuretés insolubles et elle est maintenue en état de saturation pendant toute la durée du saumurage (134). Cette saumure est dite "dynamique".

Dans le but d'obtenir des taux de sel identiques dans les fromages, la durée du saumurage dans la saumure statique a été fixée à 45 minutes à la température de 12, -13°C. Cette durée a été réduite à 35 minutes pour la saumure dynamique.

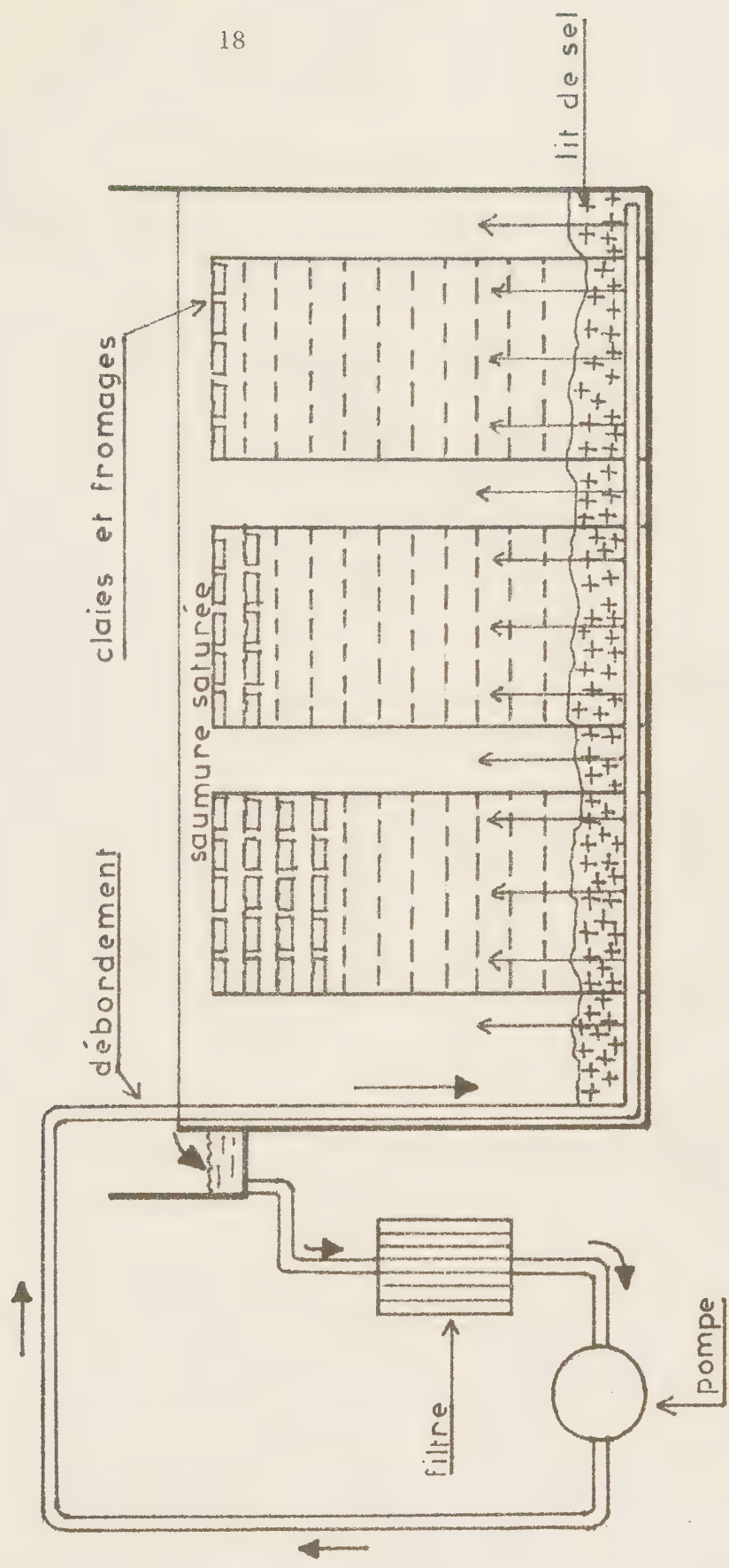
La durée d'utilisation de ces saumures a été d'environ 20 jours et le poids total de fromages saumurés pendant cette période a été sensiblement le même (17 tonnes environ). Il faut noter également que la saumure statique était réajustée en sel quotidiennement.

2.2.1.2. Etude de l'influence de l'agitation

Nous avons préparé deux saumures expérimentales d'un volume de 50 litres à une concentration en sel de 300 ± 2 (g/l).

Un des bacs n'a subi aucune agitation particulière.

Fig1 _Installation de saumurage dynamique.



Dans l'autre bac a été placé un agitateur à larges pales tournant lentement de façon à créer une turbulence à l'intérieur de la saumure.

Les fromages ont été maintenus entièrement en immersion dans les solutions salées à l'aide d'une grille métallique à larges mailles (claie de salage). De plus, dans le cas de la saumure dynamique, ils sont protégés des pales de l'agitateur par une grille identique. Leur pH et leur température ont été ajustés respectivement à 4,6 et 14°C.

2.2.1.3. Etude de l'influence de la température, du pH et de la concentration

Des saumures dynamiques expérimentales ont été préparées à une concentration de 300 ± 2 g/l. Le volume de chacune des solutions a été fixé à 50 litres de manière à avoir dans toutes les expériences au moins 2 litres de saumure par fromage. Dans ces conditions, la diminution de la concentration de la saumure pendant l'opération de salage est négligeable.

Pour étudier l'influence de la température, les saumures ont été réchauffées au bain-marie ou refroidies en les maintenant 24 heures dans une chambre froide. Leur pH a été ajusté à 4,6 par de l'acide lactique.

Pour étudier l'influence du pH, nous avons ajouté aux solutions de sel pur soit de la soude concentrée, soit de l'acide lactique pur. Leur température a été ajustée à 14°C.

Pour étudier l'influence de la concentration en sel, cinq saumures ont été préparées respectivement à 100, 150, 200, 250, 300 g/l. Elles ont toutes été ramenées à pH 4,6 par de l'acide lactique pur et réglées à la température de 14°C.

2.2.1.4. Etude de l'influence du vieillissement

Des prélèvements, d'un volume de 20 litres, de saumures industrielles en cours d'utilisation ont été utilisés pour saler des fromages provenant d'une même fabrication. Le degré de vieillissement de ces saumures a été déterminé par leur acidité et par le poids des fromages préalablement salés.

Ces échantillons ont ensuite été ajustés en NaCl à la concentration de 310 ± 2 (g/l) par adjonction de sel pur. Ce taux de concentration supérieur à toutes nos autres expériences est dû au fait que certaines de ces saumures industrielles avaient avant ajustement, une concentration voisine de 310 g et qu'une dilution par de l'eau pure aurait réduit d'autant les taux d'impureté.

Ces saumures vieilles ont été, avant utilisation, ramenées à la température de 14°C.

2.2.1.5. Etude de la diffusion du sel

Toutes les saumures utilisées ont une concentration en sel de 300 ± 2 (g/l) soit 33,9 g de sel pour 100 g d'eau. Elles sont ajustées à pH 4,6 et à une température de 14°C. Elles sont agitées mécaniquement, comme il est dit dans le paragraphe 2.2.1.2.

Les fromages sont entièrement immergés dans la saumure sauf en ce qui concerne les "double-fromages" préparés selon une technique de moulage particulière et destinés au calcul des coefficients de diffusion (cf : 2.5.1.)

Dans ce cas particulier, les fromages n'ont pas été

maintenus par une grille à l'intérieur de la saumure et ils surnagent partiellement, cette technique ayant pour but d'éviter toute pénétration du sel par une des surfaces planes.

2.2.2. Salage à sec

Le salage à sec des fromages a été effectué dans tous les cas par collage de la quantité de sel souhaitée, préalablement pesée et étalée sur une feuille de papier sulfurisé . Pour chaque fromage, 3 fractions de sel ont donc été préparées, une pour chacune des faces planes et une pour la surface cylindrique.

Afin de calculer la quantité de sel réellement collée sur le fromage, les feuilles de papier ont été ensuite séchées et repesées.

Les sels utilisés pour le salage à sec sont des sels SOLVAY dont la taille des grains se situe dans la classe granulométrique 200-400 microns et qui ont été traités avec un agent anti-mottant (ferrocyanure de potassium).

2.3. AFFINAGE DES FROMAGES

Après le salage, les fromages sont posés sur des claies métalliques. Ceux qui ont été salés en saumure sont séchés par application d'une feuille de papier filtre pendant 5 secondes environ. Cette opération a pour but d'éliminer la saumure qui humecte le fromage et d'éviter tout entraînement de sel lors des opérations de découpage.

Les fromages sont ensuite transportés dans une salle d'affinage ou haloir dont la température est réglée à 12°C et l'hygrométrie à 85 - 90 %.

A leur entrée en haloir, les fromages sontensemencés par pulvérisation d'une suspension aqueuse de spores de *Penicillium caseicolum*. Dans nos expériences cette pulvérisation s'est effectuée dans l'atmosphère des haloirs et non directement sur les fromages afin d'éviter tout risque de lavage de la surface du fromage. Par contre, pour assurer un bon développement de la moisissure, le lait de fabrication a étéensemencé avant l'emprésurage. De plus, les saumures elles-mêmes étaient fortementensemencées en spores avant chaque utilisation.

De ce fait l'apparition du *Penicillium caseicolum* s'est effectuée normalement en 4 jours environ.

les fromages sont retournés, 1 fois après 2 jours d'affinage et une fois après 6 ou 7 jours d'affinage lorsque la moisissure présente déjà un bon développement. Ils sont conditionnés vers le 11ème jour.

2.4. SELECTION DES FROMAGES

les fromages que nous avons utilisés ont toujours été préalablement sélectionnés selon deux critères : présentation et poids. Nous avons systématiquement rejeté ceux qui présentaient des défauts de forme ou de texture superficielle, ainsi que ceux qui s'écartaient trop du poids moyen des fabrications.

Dans ces conditions, nous avons pu utiliser pour toutes nos expériences des fromages ayant un poids moyen constant, une faible variation dans les dimensions et dans les taux d'humidité.

Par ailleurs, ces fromages étant toujours salés 4 heures après le démoulage, la répartition de l'humidité à l'intérieur de la pâte peut être considérée comme identique dans tous nos essais. (cf. tableau 2 page 32).

Nous donnons, ci-après, la composition moyenne des fromages avant salage, avec les écarts-types correspondants pour chaque groupe d'expériences réalisées.

a) Etude de l'influence de l'agitation et de la concentration des saumures

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 20
- . poids moyen : 284,6 g $\sigma = 2,8$ g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 10
- . humidité moyenne : 58,92 % $\sigma = 0,49$ %
- . gras sur sec moyen : 45,81 % $\sigma = 0,62$ %

b) Etude de l'influence du pH et de la température des saumures

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 30
- . poids moyen : 279,7 g $\sigma = 2,5$ g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 10
- . humidité moyenne : 60,12 % $\sigma = 0,88$ %
- . gras sur sec moyen : 44,56 % $\sigma = 0,91$ %

c) Etude de l'influence du vieillissement des saumures

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 30
- . poids moyen : 282,4 g $\sigma = 2,1$ g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromage contrôlés : 10
- . humidité moyenne : 61,38 % $\sigma = 0,65$ %
- . gras sur sec moyen : 45,12 % $\sigma = 0,74$ %

d) Etude de la diffusion du sel pendant et après saumurage

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 100
- . poids moyen : 279,9 g $\sigma = 2,2$ g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 10
- . humidité moyenne : 58,81 % $\sigma = 0,61$ %
- . gras sur sec moyen : 46,10 % $\sigma = 0,77$ %

e) Etude comparée de la diffusion du sel après saumurage et après salage à sec

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 50
- . poids moyen : 278,7 g $\sigma = 1,8$ g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 10

- . humidité moyenne : 59,60 % σ = 0,73 %
- . gras sur sec moyen : 45,28 % σ = 0,80 %

f) Calcul du coefficient de diffusion (saumurage long des doubles fromages)

- Poids des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 6
- . poids moyen : 585,4 g σ = 3,2 g

- Humidité des fromages

- . nombre de fromages contrôlés : 6
- . humidité moyenne : 59,51 % σ = 0,49 %
- . gras sur sec moyen : 45,14 % σ = 0,63 %

2.5. METHODES DE DECOUPAGE DES FROMAGES

2.5.1. Calcul des coefficients de diffusion : méthode A

Comme nous le verrons dans le paragraphe 3.2.1., le calcul des coefficients de diffusion nécessite la connaissance des taux de sel en des points précis du fromage mesurés à partir de la surface de pénétration. Le processus de diffusion s'effectuant dans l'eau du fromage, il est également nécessaire de connaître la concentration en eau à ces mêmes points.

Les concentrations ponctuelles, dans le cas de la diffusion dans des liquides purs, peuvent être obtenues par des méthodes physiques diverses (mesures de conductibilité, mesures d'indices de réfraction, etc ...). Dans le cas de produits solides et opaques, la mesure ne peut être effectuée que par échantillonnage du produit à des distances

et des temps déterminés. De ce fait, les valeurs de concentration obtenues ne peuvent plus être considérées comme ponctuelles, mais sont des valeurs moyennes pour toute l'épaisseur de l'échantillon.

Le tracé des courbes de concentration en fonction de la distance à la surface de pénétration présente donc des difficultés.

Aussi, nous avons dû faire l'approximation suivante : l'épaisseur des échantillons prélevés étant faible (4 à 6 mm) nous avons supposé qu'à l'intérieur d'une tranche, la courbe de répartition du sel était linéaire. De ce fait, la concentration mesurée, représente la concentration ponctuelle au centre de la tranche. Ainsi la concentration c obtenue dans une tranche d'épaisseur Δx prise entre les points x et $x + \Delta x$ (mesurés à partir de la surface) représente la concentration ponctuelle au point $x + \frac{\Delta x}{2}$

Nous verrons dans le paragraphe 3.2.1. que cette approximation n'a pas d'influence notable sur la détermination du coefficient de diffusion.

Pour cette partie de notre étude, nous avons fabriqué des fromages expérimentaux selon la technologie traditionnelle (cf. 2.1.) à ceci près que le caillé obtenu a été moulé dans des moules d'une hauteur double (260 mm) de celle d'un moule habituel pour Camembert.

La quantité de lait mise en oeuvre par fromage est, dans ce cas, de 4 litres et l'épaisseur de ces fromages après égouttage est de 7 cm. Nous pouvons remarquer que ces fromages ne se sont différenciés du Camembert que par cette dimension, toutes les autres caractéristiques (diamètre, humidité, texture) étant identiques.

Ce "double-fromage" a été mis en saumure 4 heures

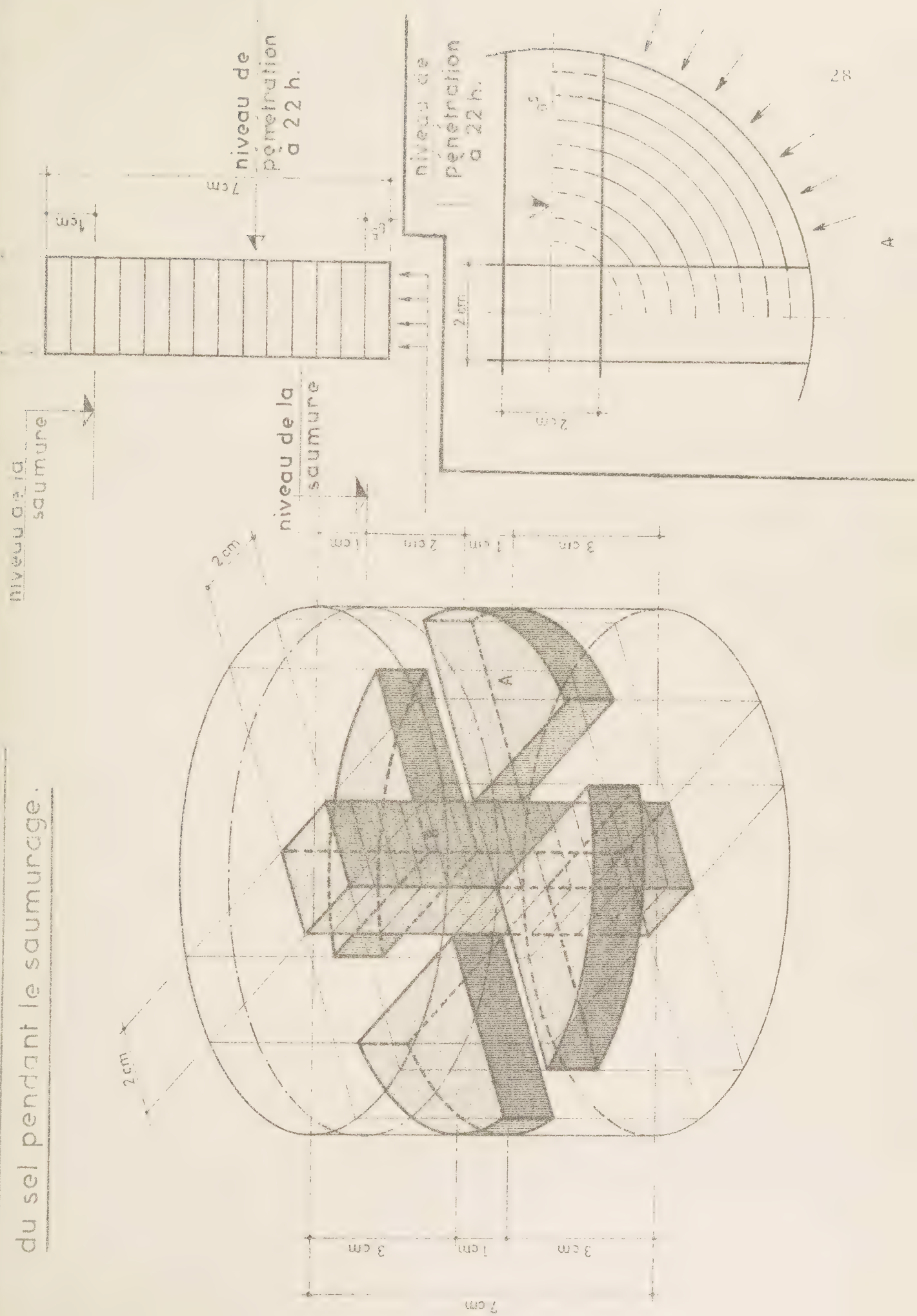
après démoulage, la partie supérieure (1 cm environ) restant émergée. Après 22 heures de saumurage, le fromage a été découpé selon la figure 2 où les parties en grisé sont les zones dans lesquelles les taux de sel et d'humidité ont été mesurés.

Cette technique de préparation et de découpage du fromage est voisine de celle qui a été appliquée par GEURTS (37) qui, dans le cas du Gouda, a fabriqué un fromage de 30 cm de diamètre et d'une hauteur de 10 cm. Après 8 jours de saumurage, le fromage était échantillonné par un tube cylindrique à bords coupants d'un diamètre de 20 mm. L'échantillon obtenu était ensuite découpé en tranches de 1 mm d'épaisseur.

Des techniques similaires ont été appliquées par d'autres auteurs, mais elles n'avaient pas toutes pour but principal le calcul des coefficients de diffusion. Mc DOWALL et WHELAN (95) découpent du Cheddar salé, en tranches parallèles à sa surface. FUTSCHIK (32) utilise un fromage de Tilsit cubique et découpe des échantillons parallèles aux surfaces planes. KOESTLER (75) découpe des portions dans des fromages d'Emmental non salés, recouvre certaines parties de ces portions avec un matériau imperméable au sel et met en contact la face non couverte avec la solution salée. Chaque portion est ensuite découpée à intervalles fixes en segments de 0,5 ou 1 cm d'épaisseur. JAKUBOWSKI (57), GEORGAKIS (35) ont également appliqué des techniques très voisines.

Notre méthode nous a permis en outre de mesurer la pénétration du sel dans les deux sens de diffusion (verticale et horizontale). Le temps de saumurage utilisé (22 h) et les zones d'échantillonnage des différentes portions nous ont permis d'éviter toute superposition des deux directions de pénétration du sel, ce qui aurait entraîné des difficultés d'exploitation des résultats. Enfin, ces zones d'échantillonnage ont été choisies dans le but d'éliminer les phénomènes de perturbation de la diffusion par les "effets de bord" (évaporation de surface, migration par capillarité, etc ...).

Fig. 2 - Méthode A : étude de la diffusion
du sel pendant le saumurage.



2.5.2. Cinétique de diffusion du sel après salage : méthode B

La méthode de découpage (figure 3) appliquée dans ce cas est différente de la précédente en raison du fait que nous avons utilisé des fromages d'un format normal, saumurés pendant des durées couramment utilisées dans la pratique fromagère ou salés à sec aux taux de sel habituel de ces produits.

De plus, l'impossibilité d'une exploitation mathématique du processus de diffusion après salage, en raison d'une concentration en surface variable dans le temps, aurait rendu inutile l'utilisation de la méthode A décrite dans le paragraphe précédent.

Par contre, la méthode B nous a permis d'étudier les allures de migration du sel et de l'eau pendant l'affinage dans les différentes parties du fromage, tel qu'il est fabriqué dans la pratique.

Chaque portion du fromage ainsi découpé a été pesée et a fait l'objet de mesures des taux de NaCl et des taux d'humidité.

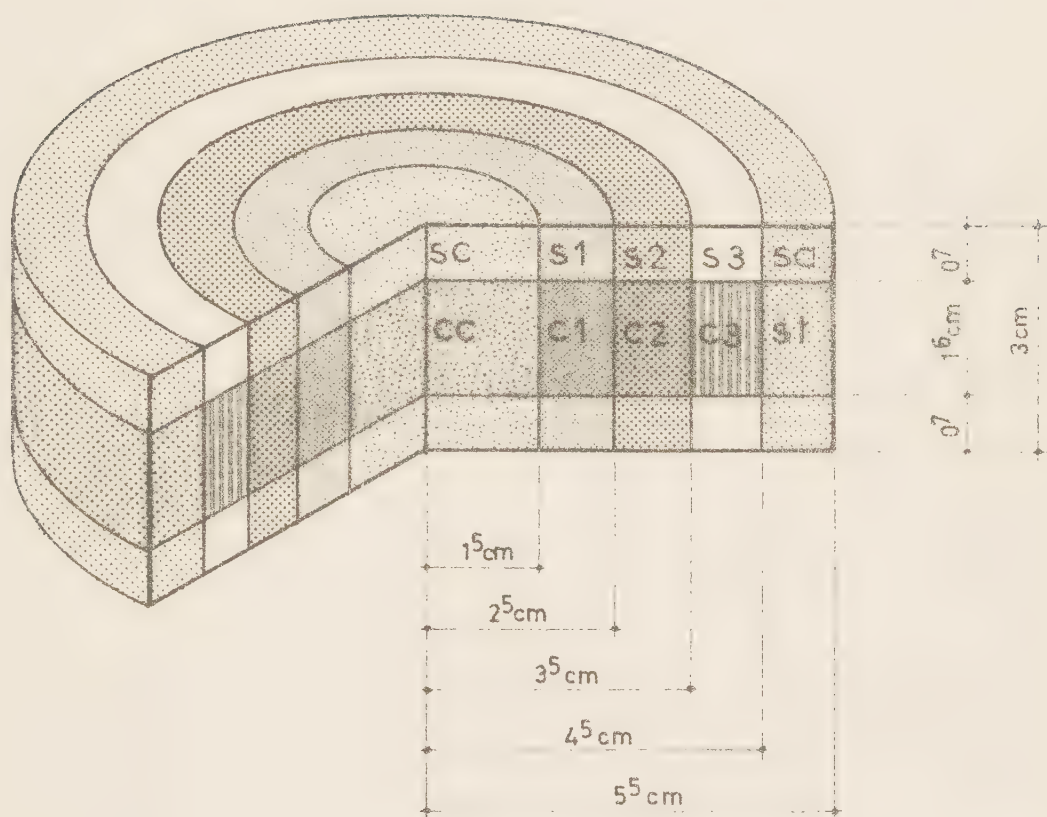
Cette même méthode a été appliquée à des fromages avant salage, en cours de salage et pendant l'affinage

2.5.3. Précision des méthodes de découpage

2.5.3.1. Méthode A

L'épaisseur des tranches obtenues après découpage a été mesurée au pied à coulisse et la variation de cette épaisseur prise

Fig.3 - Méthode B : étude de la diffusion du sel
après salage.



SC

CC

S1

S2

S3

SC

S1

C1

C2

C3

en différents points pour une même tranche a été trouvée inférieure à 0,2 mm, nous donnant un coefficient de variation inférieur à 4 %.

2.5.3.2. Méthode B

2.5.3.2.1. Variation des dimensions avant salage

Afin de vérifier la valeur de notre méthode de découpage, nous avons mesuré les dimensions des diverses tranches obtenues à partir de 10 fromages non salés. Ces mesures sont regroupées avec les écarts-types qui s'y attachent dans le tableau 2.

Nous constatons que les écarts-types sur les différentes dimensions ne dépassent pas 0,4 mm.

2.5.3.2.2. Variation des dimensions pendant l'affinage

L'épaisseur moyenne des fromages mesurée après salage en différents points de la surface a été trouvée égale à 29,9 mm ($\sigma = 0,4$ mm) pour l'ensemble des fromages salés destinés à être découpés, ces mesures étant faites au moment du découpage.

Cette épaisseur varie peu dans les 4 ou 5 premiers jours de l'affinage. Après cette période, le développement du *Penicillium caseicolum* a rendu les déterminations plus difficiles, mais l'épaisseur à 8 jours d'affinage a pu être estimée à 29,2 mm avec un écart-type $\sigma = 0,5$ mm.

En ce qui concerne les portions obtenues après découpage, des déterminations périodiques de leurs dimensions ont été effectuées et ont montré une faible variation, dans le temps, des tranches de surface 7,3 mm ($\sigma = 0,3$ mm) 2 heures après salage et 7,0 mm ($\sigma = 0,5$ mm)

Tableau 2

DIMENSIONS ET CARACTERISTIQUES DESTRANCHES OBTENUES PAR LA METHODE B DE DECOUPAGE SUR DES FROMAGES AVANT SALAGE

	Epaisseur verticale		Epaisseur horiz		Poids		Humidité		NaCl	
	moyenne (mm)	σ (mm)	moyenne (mm)	σ (mm)	moyenne (g)	σ (g)	moyenne (%)	σ (%)	moyenne (%)	σ (%)
Fromage entier	30,1	0,2	110,0	0,2	279,9	2,2	59,81	0,61	0,21	0,01
Portion SC	7,4	0,3	20,0	0,1	8,0	0,2	54,21	0,78	0,20	0,00
Portion S1	7,3	0,3	9,8	0,1	18,6	0,3	54,62	0,63	0,20	0,00
Portion S2	7,5	0,2	10,1	0,1	24,2	0,5	55,02	0,85	0,19	0,00
Portion S3	7,6	0,3	9,9	0,1	31,7	0,5	55,21	0,71	0,20	0,01
Portion SA	7,2	0,4	9,8	0,4	32,4	0,8	56,01	1,03	0,20	0,01
Portion CC	15,3	0,2	19,9	0,1	11,9	0,2	59,24	0,58	0,21	0,00
Portion C1	15,6	0,3	10,0	0,2	25,5	0,4	60,85	0,71	0,20	0,01
Portion C2	15,2	0,3	9,9	0,1	38,9	0,5	60,32	0,74	0,21	0,00
Portion C3	15,0	0,2	9,9	0,1	45,6	0,4	58,43	0,64	0,21	0,00
Portion ST	15,4	0,4	10,0	0,3	46,9	0,9	56,42	0,80	0,21	0,00

8 jours après salage.

Les dimensions des portions internes sont restées beaucoup plus stables pendant toute la durée de l'affinage épaisseur moyenne 15,2 mm ($\sigma = 0,3$ mm).

Toutes ces valeurs concernent les dimensions dans le sens vertical des fromages.

Dans le sens horizontal, nous trouvons pour le fromage entier un diamètre moyen de 109 mm ($\sigma \approx 1$ mm) se réduisant à 107 mm à 8 jours d'affinage. Les épaisseurs des tranches prises dans le sens horizontal, quant à elles, ont des variations du même ordre que dans le sens vertical.

2.6. REPARTITION DE L'EAU AVANT SALAGE

La diffusion du sel étant fortement influencée par la concentration en eau dans le substrat, il nous a paru nécessaire de connaître la répartition de l'eau dans le fromage immédiatement avant salage. Les résultats concernant les taux d'humidité sont indiqués également dans le tableau 2 où il apparaît nettement que la répartition de l'eau 4 heures après le démoulage n'est pas homogène. Toutefois, la valeur des écarts-types n'étant pas très élevée, nous estimerons que cette répartition est celle de tous les fromages 4 heures après le démoulage.

2.7. METHODES ANALYTIQUES

2.7.1. Analyses chimiques des saumures

Tous les dosages sont effectués sur des échantillons

de saumure préalablement filtrés sur filtre Whatman n° 4 et ramenés à la température de 20°C.

2.7.1.1. Acidité et pH

L'acidité de la saumure est titrée par de la soude N/9 en présence de phénol-phtaléine. Elle est exprimée en degrés DORNIC (1° D correspondant à 0,1 g/l d'acide lactique).

Le pH est mesuré à l'aide d'une pH mètre Tacussel TS4N à deux gammes de pH dont une étalée 0-14 à $\pm 0,03$ unité pH et une réduite 5,5-8, 5 à $\pm 0,01$ unité pH.

2.7.1.2. Dosage des chlorures (129)

La détermination des taux de chlorures dans les saumures a été effectuée à l'aide d'un Combi-Titreur, type 3D de marque Metrohm, selon une méthode potentiométrique dont le principe est le suivant :

Entre une électrode d'argent et une électrode au KCl plongeant dans une solution contenant des ions Cl^- , il s'établit une différence de potentiel (d.d.p.) que l'on peut lire sur l'échelle en mV d'un pH mètre. Quand on neutralise les ions Cl^- par précipitation avec des ions Ag^+ , la d.d.p. diminue. Au moment où les derniers ions Cl^- sont neutralisés, la d.d.p. subit une très forte diminution et, en choisissant des concentrations adéquates des réactifs, on peut enregistrer ses variations sur les courbes de titration. Le point final de la réaction est caractérisé par le point d'inflexion de la courbe. Les dosages ont été réalisés à l'aide de solutions de nitrate d'argent 0,1 N sur des prélèvements de 1 ml de saumure additionnés de 100 ml d'eau et de 2 ml d'acide nitrique concentré.

2.7.1.3. Dosage des matières azotées

2.7.1.3.1. Azote total (NT) (26)

La minéralisation est effectuée sur 2 ml de saumure auxquels on ajoute 3 ml d'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur (sélénium 1 g, sulfate de potassium 32 g, sulfate ferreux 5 g). Après refroidissement du matras, son contenu est repris par de l'eau distillée ; l'ensemble est dosé après distillation sur un appareil micro - Kjeldahl avec de l'acide sulfurique 0,01 N.

2.7.1.3.2. Azote soluble (NS)

50 ml de saumure sont acidifiés à pH 4,6 avec de l'acide chlorhydrique N et centrifugés 10 mn à 1800 tours. La minéralisation est effectuée comme précédemment sur 2 ml de surnageant.

2.7.1.3.3. Azote non protéique (NPN)

Les protéines sont précipitées par de l'acide trichloracétique à 24 %. Le mélange est centrifugé 10 minutes à 1800 tours/mn. La minéralisation est effectuée comme précédemment sur 4 ml de surnageant.

2.7.1.3.4. Dosage des nitrites et des nitrates (7)

Nous appliquons une méthode semi-quantitative utilisant des bandelettes de réactif Merckoquant n° 10007 traitées avec un indicateur donnant une réaction colorée avec les nitrites. La bandelette est plongée dans la saumure et par comparaison avec des couleurs standards, le contenu en nitrites peut être estimé.

Les nitrates sont réduits en nitrites par agitation d'un petit échantillon de saumure ajusté à pH 9, 6-9, 7 par un tampon

ammoniacal, avec de la poudre de cadmium. Les nitrites sont alors, de nouveau, dosés.

2.7.1.4. Dosage des minéraux (Ca, K, Mg) (45,85)

Ces dosages ont été effectués à l'aide d'un spectrophotomètre de flamme (JOBIN-YVON).

A partir d'un ml de saumure filtrée, dans une fiole jaugée de 100 ml, on ajoute 10 ml de chlorure de lanthane, puis on complète à 100 ml avec de l'eau distillée.

Cette solution est pulvérisée dans la flamme acétylène-air du spectrophotomètre. Les teneurs en Ca et Mg sont déterminées par absorption atomique, les teneurs en K le sont par émission de flamme. Les résultats sont déterminés à partir d'une gamme-étalon réalisée pour chacun des minéraux.

2.7.2. Analyse physico-chimique des fromages

2.7.2.1. Matières sèches et matières grasses (28)

Le taux des matières sèches ou extrait sec total (EST) du fromage est déterminé par la méthode officielle de la FIL (norme 4).

Le taux de matières grasses est déterminé par la méthode volumétrique de GERBER à l'aide d'un butyromètre de VAN GULIK.

2.7.2.2. Dosage des chlorures (29)

Nous appliquons la méthode de Charpentier -

Volhard normalisée par la FIL (norme 17 A) qui consiste à libérer le chlorure de sodium par destruction de la matière organique du fromage par le permanganate de potassium et l'acide nitrique.

Les ions Cl^- ainsi libérés, sont précipités à l'état de chlorure d'argent par du nitrate d'argent. L'excès de nitrate d'argent est dosé en retour par du thiocyanate de potassium en présence d'alun de fer et d'ammonium.

2.7.2.3. Méthode de mesure de la protéolyse (90)

2.7.2.3.1. Préparation de la suspension citratée de fromage

On fait une dispersion de 5 g de fromage à analyser à l'aide d'un mixer rapide, dans une solution de citrate trisodique 0,5 M pendant 8 minutes. La suspension est transférée dans une fiole de 100 ml et le volume est ajusté à 100 ml avec la solution de citrate.

2.7.2.3.2. Dosage des matières azotées

Les dosages des diverses formes d'azote (NT, NS, NPN) sont effectués à partir de la solution citratée comme nous l'avons décrit dans le paragraphe 2.7.1.3.

Les indices de maturation sont ensuite obtenus par les rapports NS/NT et NPN/NT.

III - RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. INFLUENCE DE LA COMPOSITION DES SAUMURES SUR LE SALAGE ET L'AFFINAGE

3.1.1. Evolution chimique des saumures (figures 4, 5, 6)

La composition physico-chimique des saumures en cours d'utilisation est caractérisée essentiellement par l'augmentation régulière de la quantité d'impuretés provenant du fromage (43, 44, 62, 78, 80).

Les deux techniques de saumurage utilisées ne font pas apparaître de différences significatives dans l'évolution des différents constituants étudiés (Ca, Mg, K, azote total, azote soluble, azote non protéique, acidité). Si l'agitation de la saumure favorise les échanges eau-NaCl, comme nous le verrons dans le paragraphe 3.1.2.5., elle entraîne aussi la nécessité de réduire les durées de saumurage dans le but d'obtenir des taux de sel équivalents à ceux qui seraient obtenus dans une saumure statique.

En conséquence, la perte d'eau et de certains constituants solubles du fromage se trouve ramenée à celle d'une saumure non agitée.

Fig. 4 – Evolution chimique des saumures : acidité et pH.

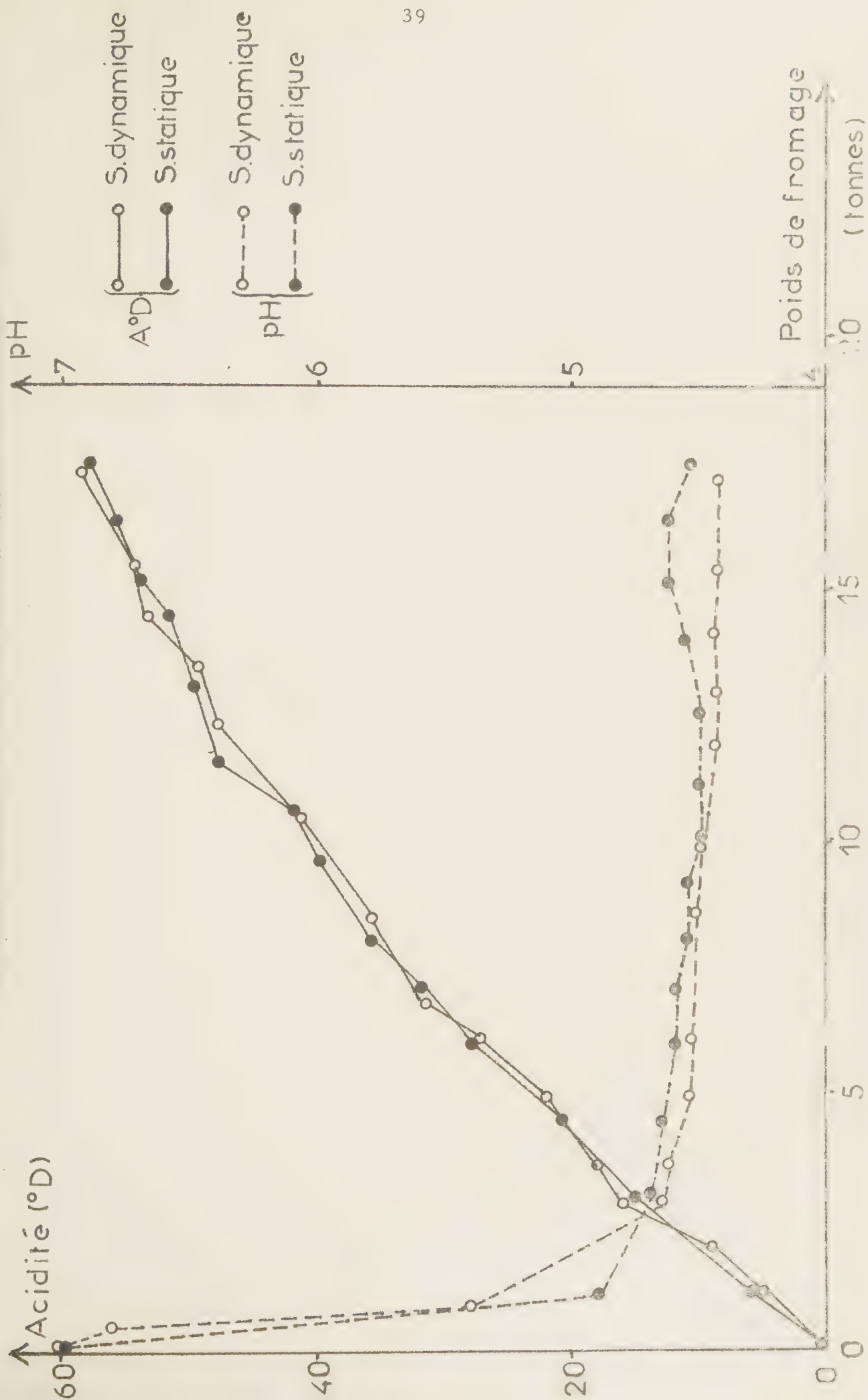


Fig. 5 - Evolution chimique des saumures: matières azotées.

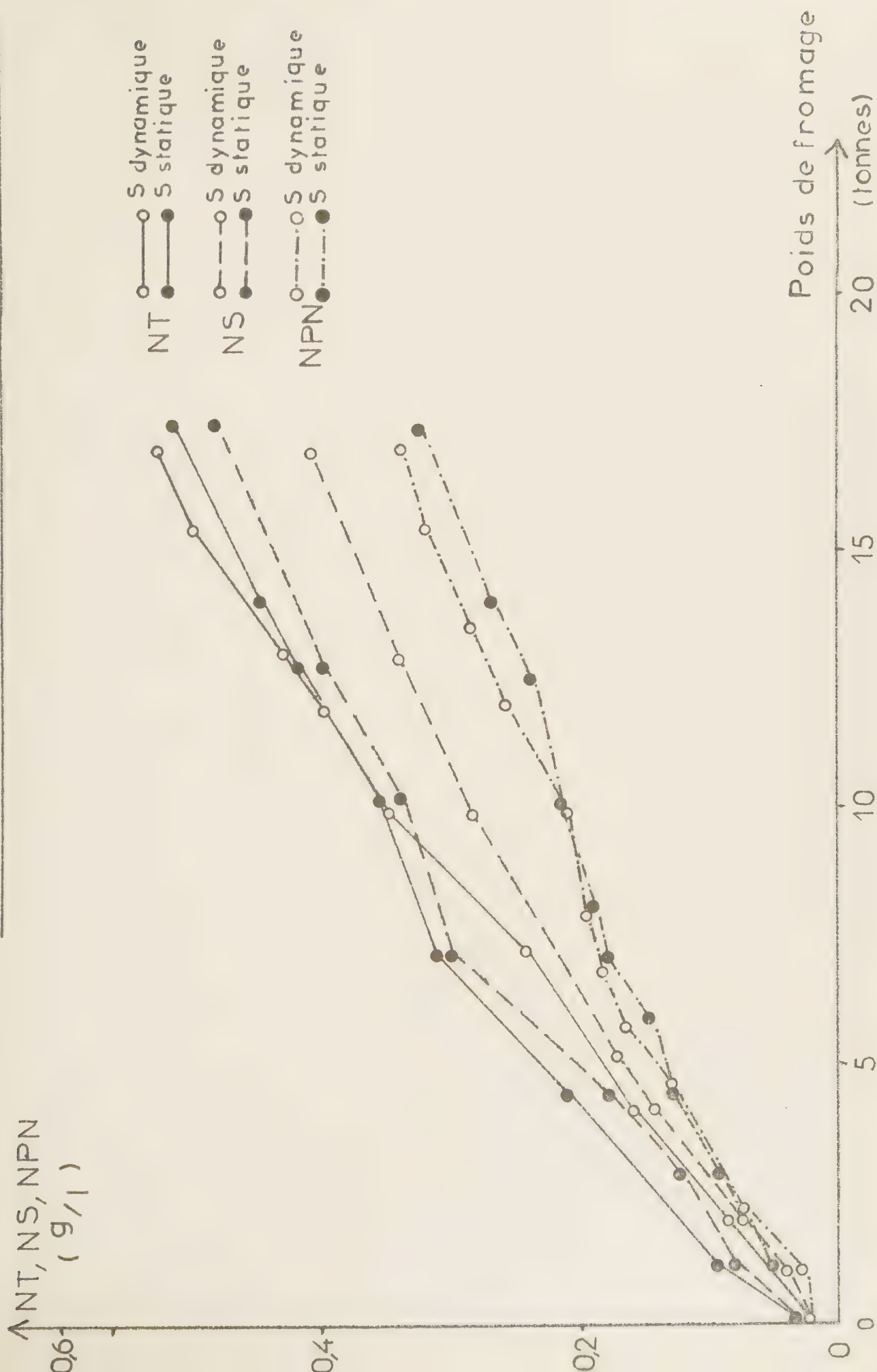
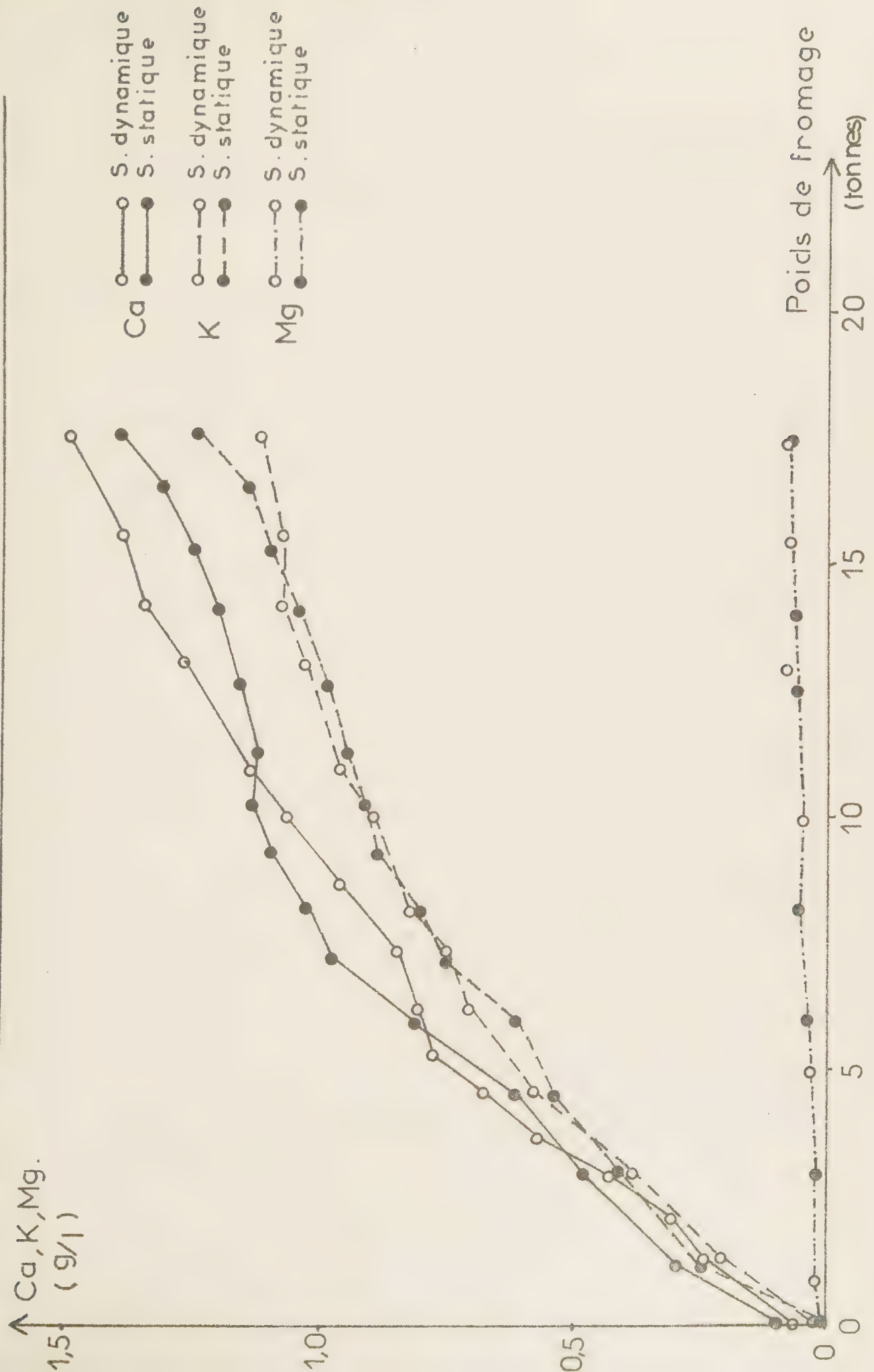


Fig. 6_Evolution chimique des saumures : matières minérales.



Nous n'avons pas présenté les résultats concernant le contenu en nitrites ou nitrates, la méthode semi-quantitative appliquée (7) n'ayant pas révélé la présence de ces ions.

L'évolution de l'acidité et du pH des deux saumures nécessitent toutefois certaines remarques particulières :

- a) il est notable que l'évolution de l'acidité a une allure générale identique à celle des autres constituants et les corrélations entre l'augmentation du calcium et de l'azote total d'une part et l'augmentation de l'acidité d'autre part (figure 7) sont très élevées : les coefficients de corrélation r sont respectivement 0,991 et 0,993.

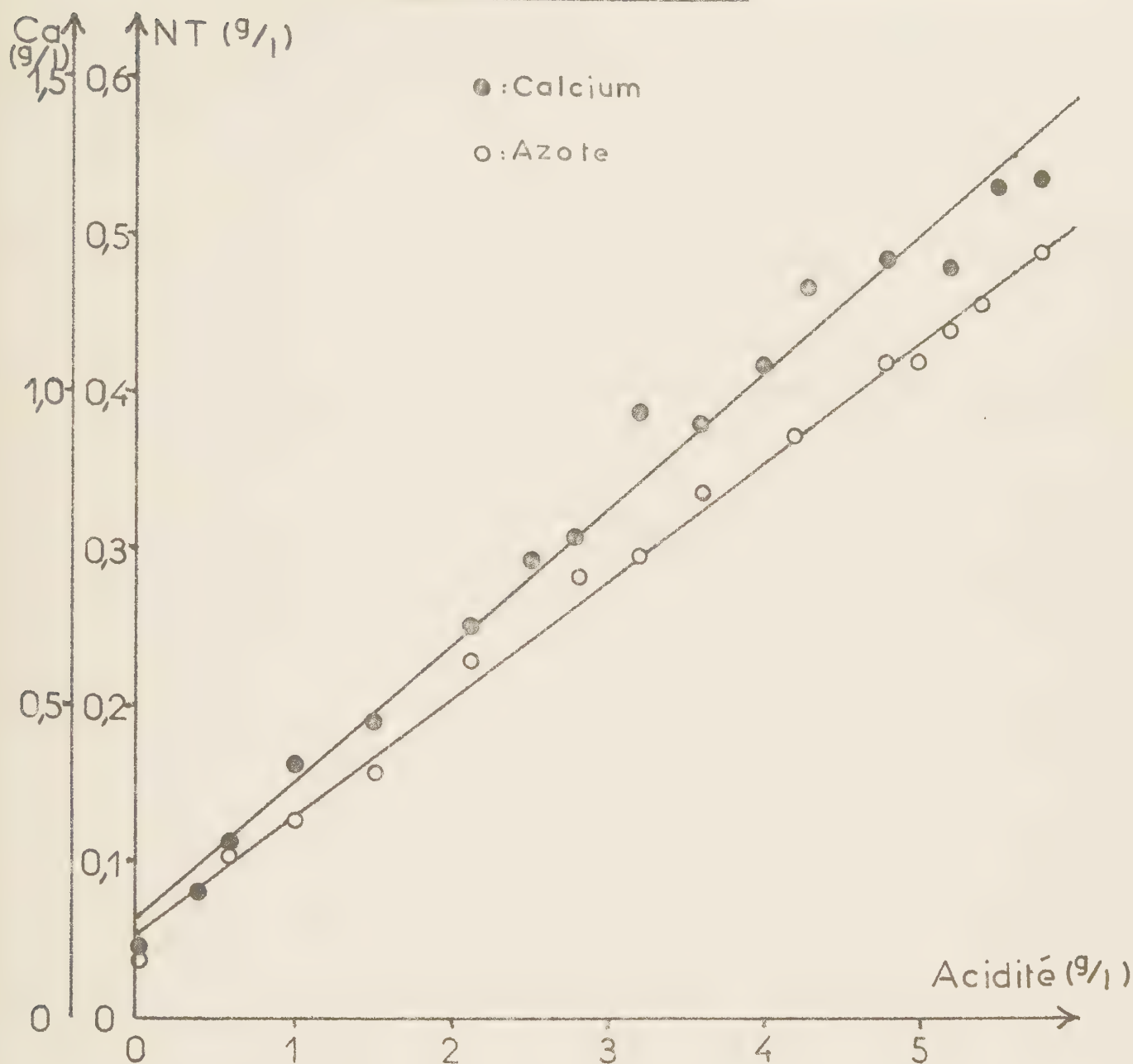
Il paraît donc possible, pour un type de fromage déterminé, d'évaluer les taux d'impuretés de la saumure par une simple mesure d'acidité.

- b) le rapport entre l'augmentation du calcium et celui de l'acide lactique est égal à 0,219. Le rapport entre l'augmentation de l'azote total et celui de l'acide lactique est égal à 0,076.

Ces rapports sont du même ordre de grandeur que ceux qui existent dans un sérum de fin d'égouttage de pâtes molles (respectivement 0,23 et 0,10). Ceci nous conduit à émettre l'hypothèse que la composition du liquide qui sort du fromage pendant le saumurage est celle de ce sérum.

Dans le but de confirmer cette hypothèse, nous avons repris un certain nombre de résultats concernant la composition de saumures expérimentales que nous avons nous-mêmes obtenus dans le cas du Camembert (44).

Fig.7 - Evolution du calcium et de l'azote total 43
en fonction de l'acidité.



Equations de régression :

Calcium: $Y = 0,219X + 0,161$ $r = 0,991$

Azote $Y = 0,076X + 0,053$ $r = 0,993$

Pour des fromages saumurés pendant 60 mn, les mesures effectuées dans les saumures nous ont permis de calculer les pertes pour 100 g de fromage :

. calcium	: 0,013 g
. potassium	: 0,007 g
. magnésium	: 0,0004 g
. azote total	: 0,004 g

Par ailleurs la perte d'humidité mesurée dans le fromage était dans ces expériences de 3,8 g pour 100 g de fromage non salé.

Partant de l'hypothèse que cette humidité perdue est constituée par du sérum de fin d'égouttage dont la composition moyenne est indiquée dans le tableau 3 (d'après WEBER (148)), nous constatons que les pertes théoriques seraient pour 100 g de fromage :

. calcium	: 0,011 g
. potassium	: 0,007 g
. magnésium	: 0,0006 g
. azote total	: 0,0046 g

Nous pouvons remarquer que ces valeurs sont très voisines des résultats expérimentaux et confirment donc notre hypothèse.

Ca mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	NT mg/l	ac. lactique g/l
2900	1900	180	600	1230	12

Tableau 3 - Composition d'un sérum de fin d'égouttage
de Camembert

- c) Il n'existe pas de corrélation entre l'acidité de la saumure et son pH. Nous constatons, en effet, que le pH de la saumure se stabilise très rapidement au cours de son utilisation à une valeur voisine de pH 4,5 alors que l'acidité augmente régulièrement.

De ce fait, la mesure de l'acidité ne donne aucune indication valable sur l'importance du caractère acide de la saumure. Cette remarque a, d'ailleurs, été précédemment formulée par quelques auteurs qui ont indiqué que la mesure du pH est un bien meilleur guide que l'acidité pour la connaissance de l'importance de la déshydratation du fromage pendant le saumurage (110, 112, 136, 139).

Nous avons pu confirmer ces résultats en étudiant les relations qui existent entre l'acidité et le pH de diverses saumures. Ainsi, nous pouvons remarquer que le pH de la saumure et le niveau auquel celui-ci se stabilise sont fonction de divers facteurs.

En ajoutant de l'acide lactique pur à une solution de sel (figure 8), les courbes $\text{pH} = f(A^\circ\text{D})$ se décalent lorsque nous faisons varier la concentration en sel. L'écart est dû essentiellement aux variations de pH des solutions de sel pur.

Par ailleurs, lorsque nous ajoutons du lactosérum acide à une saumure pure, ou à une saumure déjà acidifiée par de l'acide lactique, le pH et l'acidité évoluent vers le point figuratif de ce sérum (figure 9). Ce qui se passe dans une saumure industrielle n'est rien d'autre que l'adjonction quotidienne de petites quantités de sérum à 110 - 120° D et à pH voisin de 4,6 suivies de resaturation de la solution en sel qui expliquent les valeurs stationnaires de pH obtenues. Les légères remontées de pH observées sur la figure 4 avec la saumure statique peuvent s'expliquer facilement par une diminution accidentelle de la concentration en sel.

Fig 8 - Addition d'acide lactique à des solutions de NaCl.

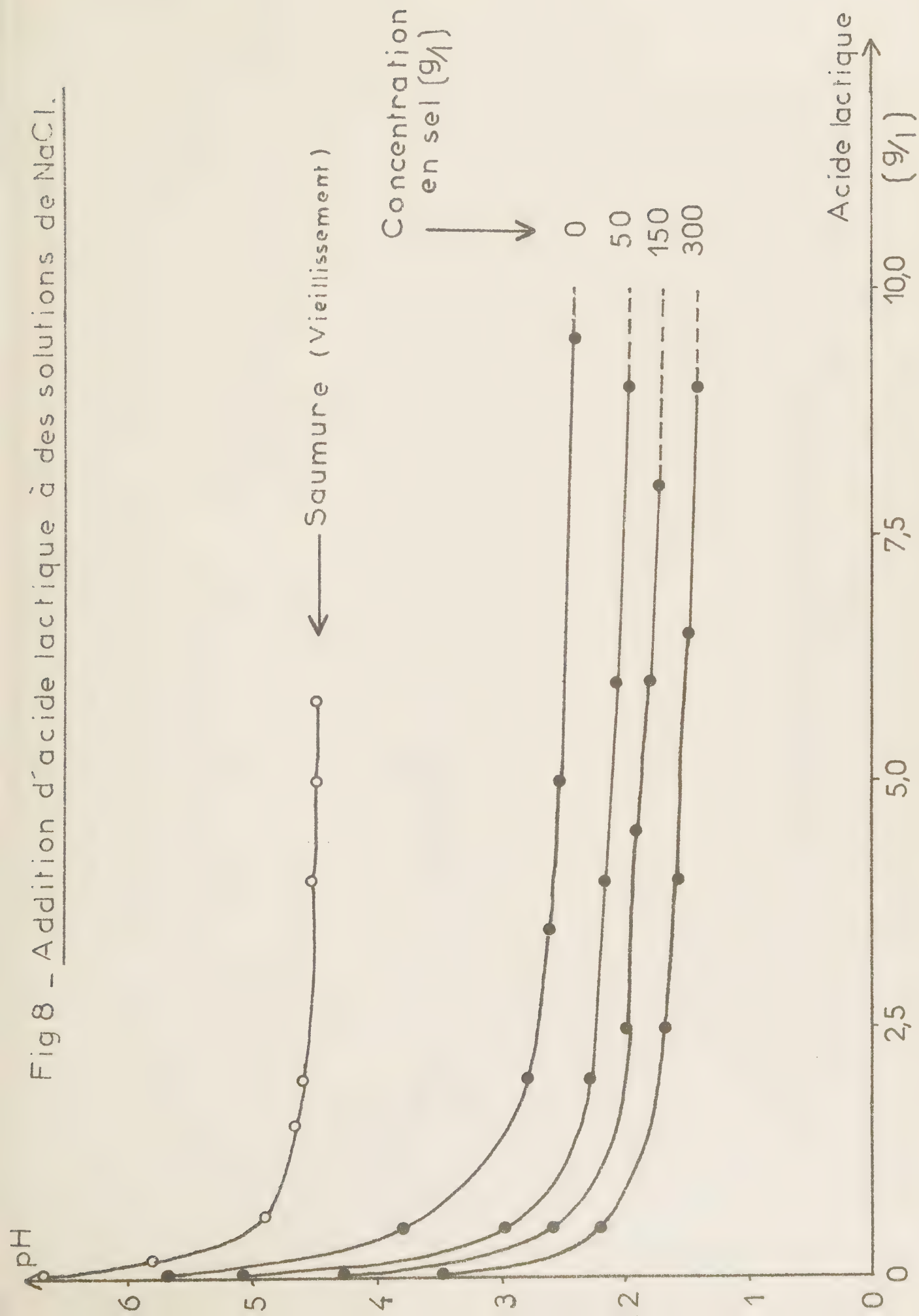
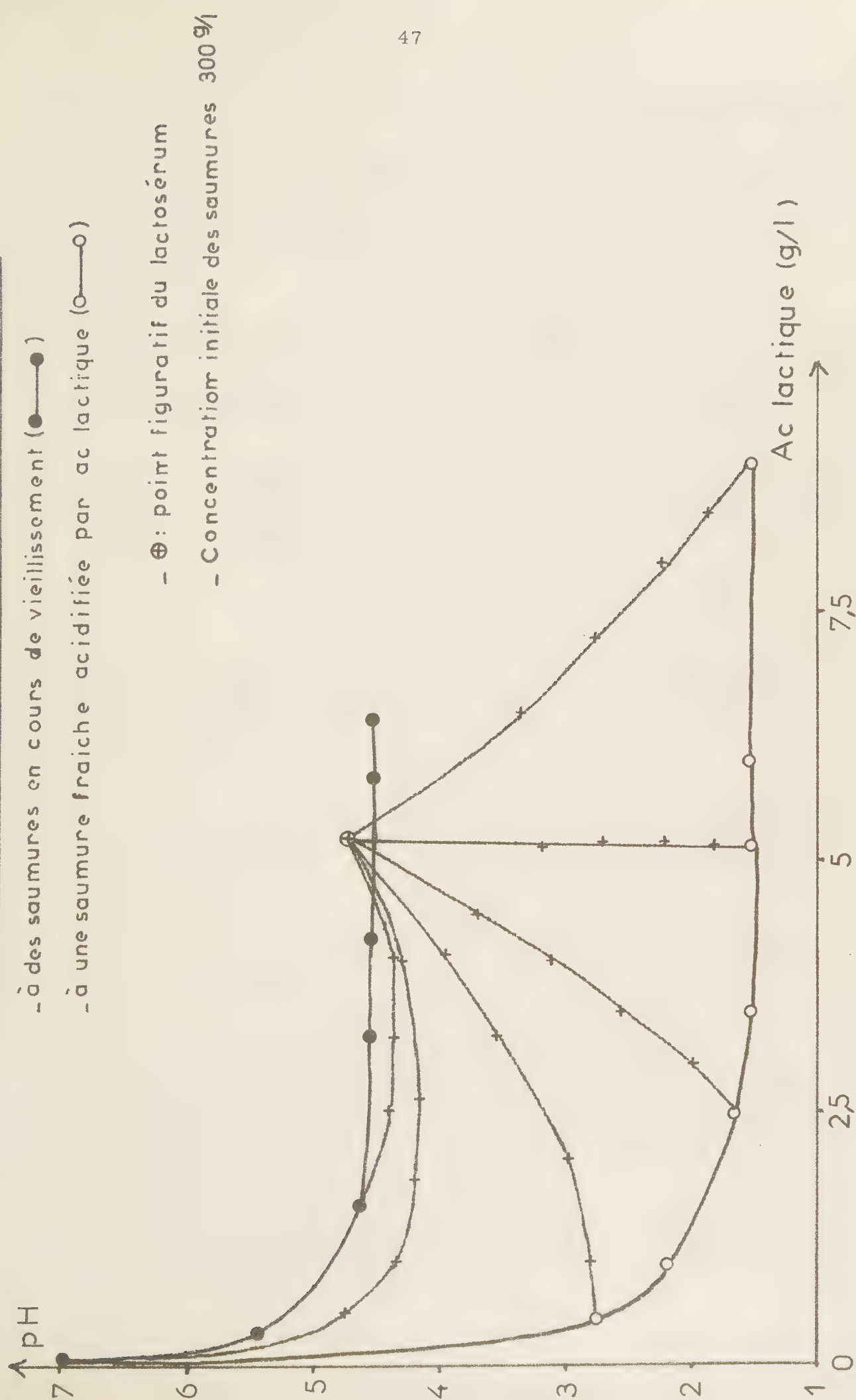


Fig 9 - Addition de lactosérum (pH 4,7 - A°D 52) (+---+):



3.1.2. Influence de diverses caractéristiques de la saumure

L'allure générale des courbes d'absorption de sel par le fromage, en fonction de la durée de saumurage est celle représentée sur la figure 11. Comme nous le verrons plus loin (paragraphe 3.2.), la quantité de sel absorbée par le fromage est une fonction de la durée de saumurage.

Mais divers paramètres propres à la saumure font varier le degré de salage et, de ce fait, peuvent influencer l'affinage du fromage. Nous avons étudié successivement l'influence de la température du pH, de la concentration, de l'agitation et du vieillissement.

Pour chacune de ces expériences, 3 fromages ont été prélevés et les mesures ont été effectuées par échantillonnage sur le mélange de ces 3 fromages après broyage et homogénéisation dans un mixer rapide de type ménager.

3.1.2.1. Influence de la température (tableau 4)

Les taux de NaCl (% H_2O) obtenus dans les fromages après une durée de saumurage de 60 minutes augmentent progressivement lorsque la température de la saumure s'élève (coefficient de corrélation $r = 0,97$).

De même, la perte d'humidité augmente, surtout lorsque la température atteint des valeurs supérieures à $17^{\circ}C$ (coefficient de corrélation $r = 0,70$).

La température a donc une influence favorable sur l'échange eau-NaCl pendant le saumurage.

Il paraît donc nécessaire dans la pratique, si l'on veut obtenir un bon réglage des taux de sel, de stabiliser la température des saumures qui a tendance à augmenter au cours d'un cycle quotidien d'utilisation par suite de l'apport de calories par les fromages (117).

Tous les auteurs qui ont étudié l'influence de la température sur les caractéristiques de qualité de divers fromages (24, 51,

Tableau 4

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

CONDITIONS DE SAUMURAGE : concentration de la saumure 302 g/l = 33,9 %
 pH de la saumure 4,6
 durée du saumurage 60 mn

1 - TEMPERATURE DES SAUMURES AVANT SAUMURAGE

T (°c)	A	B	C	D	E
	8	12	17	20	25

2 - COMPOSITION DES FROMAGES 5 J APRES SAUMURAGE

	A	B	C	D	E
NaCl (%)	2,10	2,12	2,16	2,19	2,20
NaCl (% H ₂ O)	3,62	3,62	3,70	3,78	3,87
EST (%)	41,98	41,45	41,58	42,05	43,22
NT (%)	2,77	2,75	2,98	2,76	2,90
NS (%)	0,36	0,35	0,31	0,31	0,32
NPN (%)	0,24	0,28	0,21	0,25	0,25
NS (% NT)	13,0	12,7	10,7	11,2	11,0

3 - COMPOSITION DES FROMAGES 15 J. APRES SAUMURAGE

	A	B	C	D	E
NaCl (%)	2,11	2,14	2,16	2,17	2,17
NaCl (% H ₂ O)	3,77	3,83	3,86	3,92	3,93
EST (%)	44,04	44,12	43,98	44,62	44,84
NT (%)	2,80	2,85	2,98	2,83	2,95
NS (%)	0,79	0,81	0,83	0,77	0,78
NPN (%)	0,59	0,63	0,63	0,60	0,65
NS (% NT)	28,2	28,4	27,8	27,2	26,4

76, 98, 104, 108) indiquent que la température optimale devrait se situer vers 12-15°C.

Nos propres résultats concordent avec cette opinion, les taux de protéolyse mesurés par le rapport NS/NT étant, en effet, plus faibles dans la gamme 17-25°C que dans la gamme 8-17°C (coefficient de corrélation à 5 jours $r = -0,85$).

3.1.2.2. Influence du pH de la saumure (tableau 5)

Les résultats obtenus montrent qu'à l'inverse de la température, une variation de pH importante agit peu sur la quantité de sel prise par le fromage ($r = 0,74$).

Par contre, son action sur la perte d'eau pendant le salage n'est pas négligeable : une saumure acide tend d'avantage à réduire le degré d'humidité du fromage qu'une saumure neutre ou basique ($r = - 0,93$).

L'effet du pH de la saumure sur la protéolyse est peu significatif ($r = - 0,74$ pour les valeurs à 5 jours d'affinage). Mais il est connu qu'il joue un rôle important sur l'apparition de défauts de texture de la croûte (ramollissement) en raison de l'augmentation de la solubilité de la caséine avec l'élévation du pH (65). De plus, le développement des moisissures de surface est largement influencé par le pH (53) et une neutralisation même partielle de la surface du fromage par passage dans une saumure neutre ou basique peut favoriser le développement de moisissures indésirables (*Fenicillium glaucum*, Mucorales) (9, 97).

3.1.2.3. Influence de la concentration de la saumure (figure 10)

INFLUENCE DU pH DE LA SAUMURE

Tableau 5

CONDITIONS DE SAUMURAGE : concentration de la saumure 302 g/l = 33,9 %
température 14°C
durée du saumurage 60 mn

1 - pH DES SAUMURES AVANT SAUMURAGE

pH	A	B	C	D	E
	1,5	2,4	3,9	6,0	8,3

2 - COMPOSITION DES FROMAGES 5 J. APRES SAUMURAGE

	A	B	C	D	E
NaCl (%)	2,12	2,11	2,17	2,17	2,19
NaCl (%H ₂ O)	3,63	3,59	3,66	3,64	3,68
EST (%)	41,67	41,21	40,69	40,36	40,58
NT (%)	2,61	2,64	2,68	2,70	2,69
NS (%)	0,35	0,34	0,38	0,30	0,31
NPN (%)	0,30	0,29	0,28	0,22	0,21
NS (%NT)	13,4	12,9	14,1	11,1	11,5

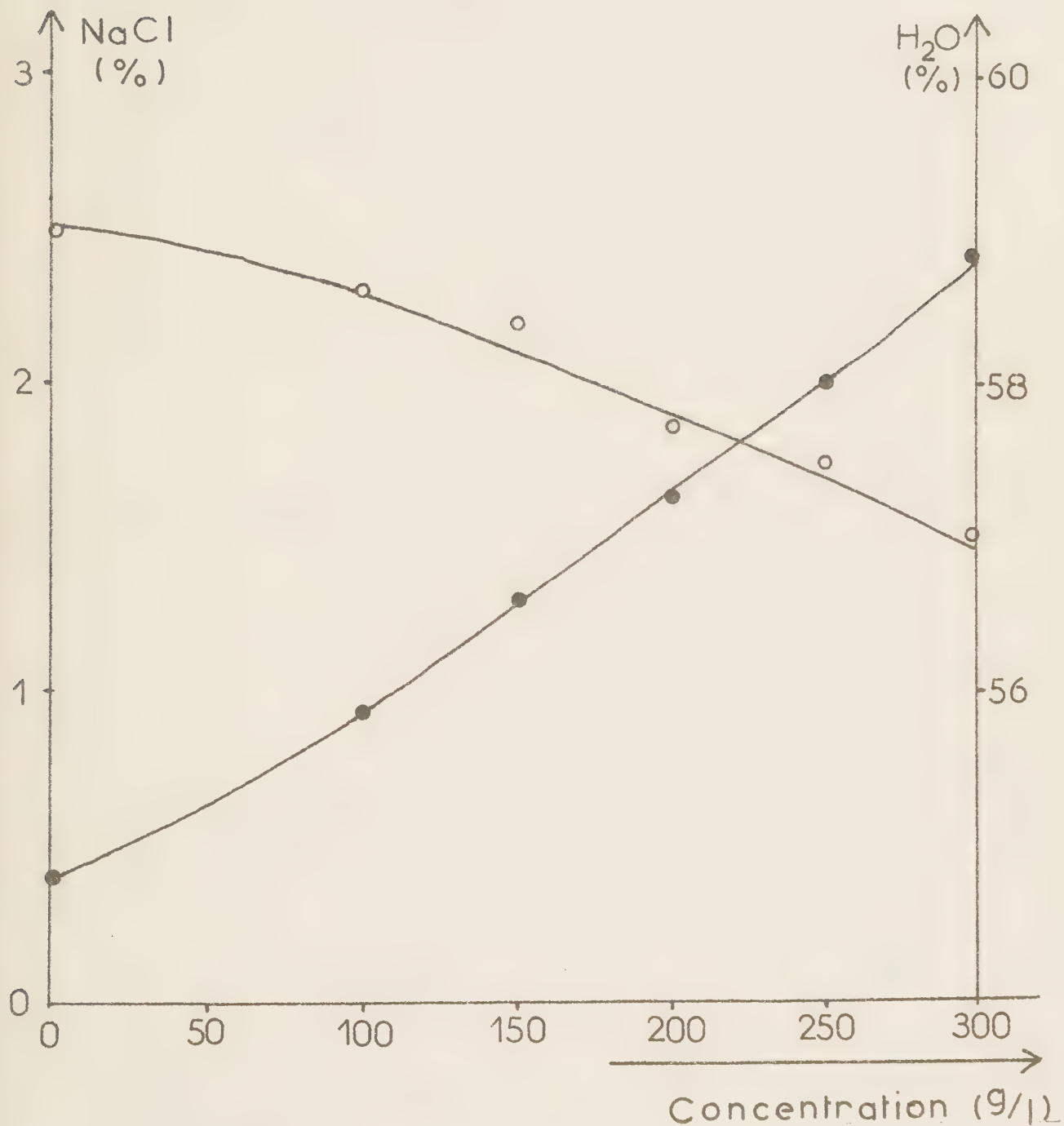
3 - COMPOSITION DES FROMAGES 15 J. APRES SAUMURAGE

	A	B	C	D	E
NaCl (%)	2,22	2,17	2,20	2,24	2,26
NaCl (% H ₂ O)	3,98	3,86	3,84	3,90	3,91
EST (%)	44,28	43,84	42,78	42,60	42,20
NT (%)	2,72	2,69	2,74	2,71	2,81
NS (%)	0,71	0,70	0,75	0,69	0,71
NPN (%)	0,58	0,62	0,60	0,59	0,62
NS (%NT)	26,1	26,0	27,4	25,5	25,3

4 - pH DES SAUMURES APRES SAUMURAGE

	A	B	C	D	E
pH	1,7	3,0	4,3	5,4	6,1

Fig.10 - Influence de la concentration de la saumure.



durée de saumurage : 60 mn.

●—● NaCl
○—○ H₂O

Ce paramètre a fait l'objet de nombreux travaux (110, 120, 128, 139) et il est bien connu qu'il joue un rôle déterminant sur la durée de salage nécessaire pour obtenir le taux de sel désiré. Il a aussi une importance microbiologique certaine, en particulier en ce qui concerne les possibilités de survie dans la saumure de certains types de microorganismes pouvant causer des défauts dans la maturation des fromages (15, 17, 40, 62, 128).

La figure 10 montre clairement l'existence de relations quasi-linéaires entre l'absorption de sel et la concentration de la saumure pour divers temps de saumurage. Il en est de même de la perte d'humidité.

L'équation à laquelle nous aboutissons dans le paragraphe 3.2.5. confirmera cette proportionnalité entre la concentration de la saumure et la pénétration du sel dans le fromage.

3.1.2.4. Influence du vieillissement de la saumure (tableau 6)

Dans la gamme de saumures étudiées, les différences dans le degré de salage ne sont pas significatives, les coefficients de corrélation entre les taux de sel et le vieillissement mesuré par l'acidité étant égaux à 0,43.

Toutefois deux aspects, qui sont probablement liés, méritent d'être soulignés :

- a) Le développement de *Penicillium candidum* a été plus rapide dans le cas des saumures C et D se situant respectivement à 3,2 et 4,2 g/l d'acide lactique.
- b) Les taux de protéolyse dans les fromages après 15 jours d'affinage sont

Tableau 6

INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT DES SAUMURES SUR LA COMPOSITION DES FROMAGES

1 - COMPOSITION DES FROMAGES AVANT SAUMURAGE									
NaCl (%)	pH	EST (%)	MG (%)	NT (%)	NS (%)	NPN (%)	Na (%)	Ca (%)	K (%)
0,27	4,65	38,62	17,4	2,28	0,41	0,29	0,07	0,28	0,16

2 - COMPOSITION DES SAUMURES UTILISEES							
	A	B	C	D	E	F	G
A (g/l)	0	1,6	3,2	4,2	5,2	5,8	6,4
pH	7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
NaCl (g/l)	308,5	311,2	309,7	307,9	310,1	310,8	309,2
NT (mg/l)	25	159	290	373	486	524	578
NS (mg/l)	20	128	251	349	460	492	581
NPN (mg/l)	5	85	172	220	265	312	334
K (mg/l)	10	540	780	995	1130	1310	1440
Ca (mg/l)	50	610	910	1160	1340	1520	1680
Mg (mg/l)	0	20	30	35	35	40	45
Poids fromages (*) (t)	0	3,8	8	11,2	15,3	17,7	19,9

3 - COMPOSITION DES FROMAGES 15 J. APRES SAUMURAGE							
	A	B	C	D	E	F	G
NaCl (%)	2,54	2,55	2,48	2,58	2,48	2,45	2,46
NaCl (%H ₂ O)	4,35	4,43	4,24	4,52	4,31	4,20	4,20
EST (%)	41,60	42,47	41,51	42,89	42,45	41,67	41,50
NT (%)	2,47	2,63	2,53	2,62	2,60	2,48	2,42
NS (%)	0,70	0,72	0,77	0,78	0,75	0,70	0,66
NPN (%)	0,64	0,64	0,65	0,63	0,62	0,62	0,62
NS (%NT)	28	27	30	30	29	28	27
Na (%)	1,05	1,11	1,02	1,23	1,05	0,94	0,98
Ca (%)	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30	0,26	0,24
K (%)	0,15	0,17	0,20	0,20	0,23	0,19	0,18

4 - IMPORTANCE DU DEVELOPPEMENT DU PENICILLIUM CASEICOLUM A 4 J.							
	A	B	C	D	E	F	G
	+	+++	++++	++++	++	++	+

(*) : Les poids de fromages (exprimés entonnes), ici indiqués, correspondent à la masse de fromages préalablement salés dans une saumure de 800 kg.

Conditions de saumurage : température : 14°C

durée : 60 mn

légèrement supérieurs pour ces mêmes saumures.

Si cette tendance était confirmée par l'analyse statistique d'un grand nombre d'expériences, il faudrait alors rechercher l'influence des impuretés de la saumure indépendamment du pH sur le développement du *Penicillium* et sur son activité protéolytique.

Pour notre part, nous avons effectué 3 séries d'expériences et nous avons à chaque fois retrouvé ces mêmes phénomènes lorsque la saumure titrait environ 4 g/l d'acide lactique.

3.1.2.5. Influence de l'agitation (figure 11)

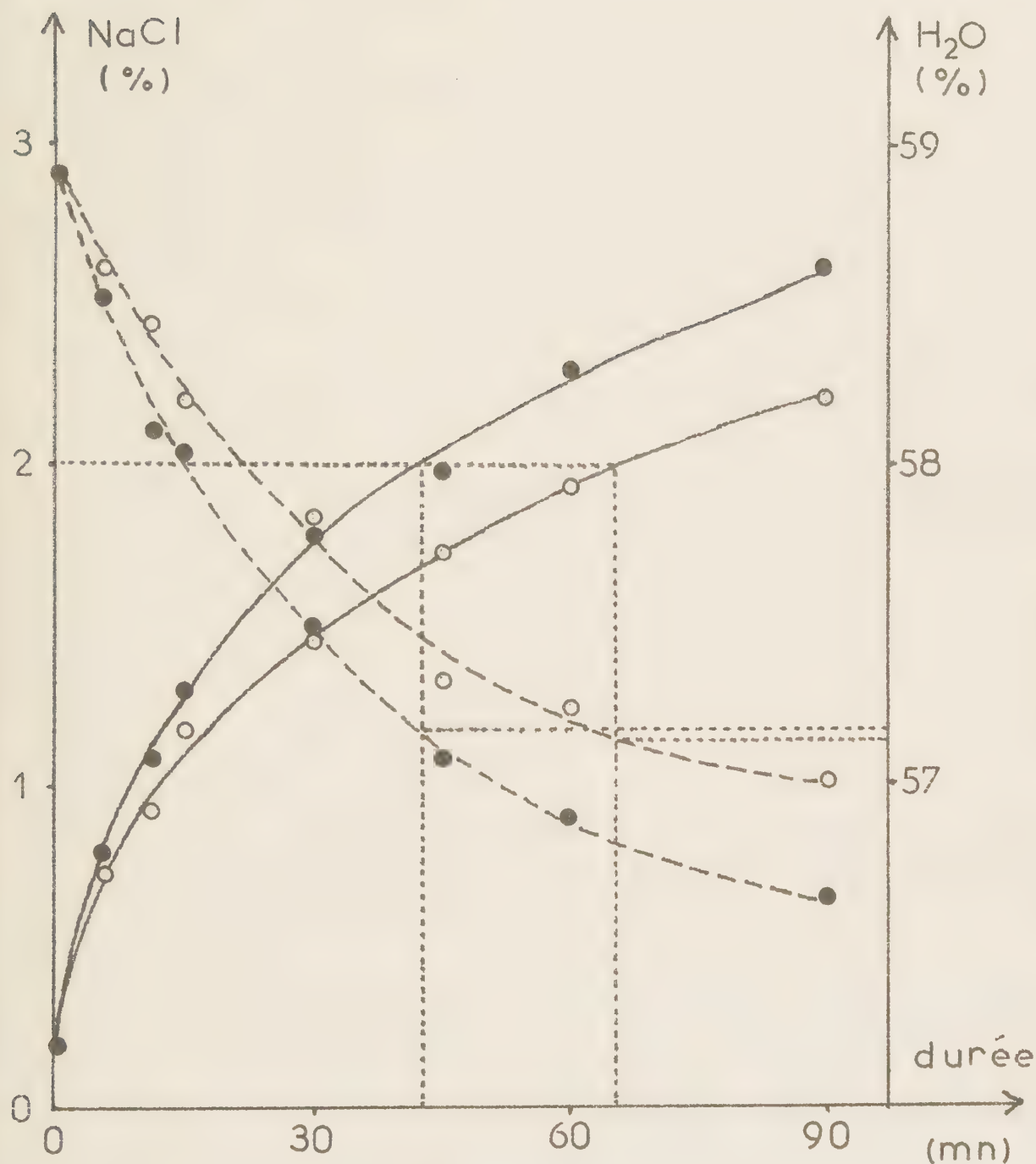
Ce paramètre a été étudié précédemment par quelques auteurs (98, 120) et les résultats que nous avons obtenus dans le cas du Camembert sont en accord avec leurs conclusions : l'agitation favorise les échanges eau-NaCl entre le fromage et la saumure.

La concentration en sel de la saumure ayant un effet important sur la quantité de sel absorbée par le fromage au bout d'un temps déterminé, la dilution par l'eau sortant du fromage au voisinage de celui-ci, dans une saumure statique, ralentit la pénétration du sel et la sortie du sérum.

En pratique, afin de réduire la durée de l'opération de saumurage, il paraît donc intéressant de créer une agitation dans les bacs de saumurage, d'autant plus que dans ces conditions, la perte d'eau subie par le fromage reste identique (tableau 7).

Par ailleurs, cette technique présenterait l'avantage d'éviter des variations importantes des échanges eau-NaCl entre les fromages, selon leur position à l'intérieur de la saumure.

Fig.11 -Influence de l'agitation sur l'absorption
de sel et la perte d'eau.



H_2O {

 ● — — — ● S. dynamique

 ○ — — — ○ S. statique

 NaCl {

 ● — — — ● S. dynamique

 ○ — — — ○ S. statique

	Saumure statique	Saumure dynamique
Durée de salage (mn)	70	44
NaCl (%)	2	2
H ₂ O (%)	57,10	57,15

Tableau 7 - Influence de la durée de saumurage sur l'absorption de sel et la perte d'eau.

31.3. Discussion

Beaucoup de paramètres ont donc une influence sur l'absorption de sel par le fromage et entraînent des variations de l'affinage et de la qualité organoleptique du produit.

- Une première constatation s'impose : le salage par saumurage ne s'effectue pas dans un milieu parfaitement constant. La saumure s'enrichit en impuretés provenant du fromage au fur et à mesure de son utilisation. Si du sel insuffisamment purifié est utilisé pour sa préparation, elle s'enrichira probablement aussi en d'autres éléments par suite des recharges en sel qui sont nécessaires pour conserver une concentration suffisante.

Ces impuretés ont-elles une influence importante sur la qualité

organoleptique du produit ? Il nous est difficile de répondre à cette question. Toutefois, il apparaît que la saumure évolue progressivement vers un mélange qui serait constitué de sérum de fin d'égouttage et de sel. Certains auteurs ont, dans cet ordre d'idées, déjà préconisé l'utilisation de saumures préparées à partir du sérum pour le salage de certains fromages à pâte pressée, partant de l'observation que, pour ces produits, le calcium joue un rôle utile pour la formation de la croûte (36, 79, 141, 150). Il n'est pas certain, cependant, que ce type de saumure puisse être intéressant dans le cas des fromages à pâte molle où un durcissement trop important de la surface constituerait un défaut de fabrication.

- Il est important de connaître et de stabiliser la température de la saumure, car elle influence la protéolyse et donc la qualité organoleptique du fromage.

Ce résultat semble être une conséquence de l'augmentation de l'absorption de sel et de la perte d'eau avec l'élévation de la température.

En effet, les activités enzymatiques (protéasiques dans le cas qui nous concerne) sont fortement influencées par l'activité de l'eau (30, 54, 111). De la même façon, le développement de la microflore lactique qui participe à la protéolyse est également soumis à l'influence de la concentration en sel (69, 70, 92). Il en est de même pour le développement du *Penicillium caseicolum* et pour son activité protéolytique.

Il en résulte donc que toute cause d'augmentation du taux de NaCl et du taux de matières sèches du fromage tendra à diminuer l'importance de la protéolyse.

Il faut noter, par ailleurs, qu'une augmentation du taux de sel dans la pâte peut avoir une influence importante sur les caractéristiques organoleptiques du produit indépendamment du fait que le goût salé sera plus prononcé (113, 133). L'action protéolytique de la présure animale sur

la β -caséine est en effet réduite lorsque des taux de sel voisins de 5 % sont atteints (109) alors que la protéolyse de l' α -caséine, au contraire est favorisée lorsque cette concentration est atteinte. On peut donc penser qu'une variation, même faible, des taux de sel puisse entraîner des changements dans la composition et les proportions des peptides formés.

- Le pH de la saumure et l'allure de son évolution dépendent du pH originel de la solution de sel, de la concentration de cette solution, de la quantité de sérum sortant du fromage, de l'acidité et du pH de ce sérum. Toutefois, il se stabilise rapidement à une valeur voisine du pH du sérum de fin d'égouttage : 4,6 .

Compte tenu de l'effet d'une saumure trop acide sur la déshydratation du fromage, il convient de préconiser, pour le salage en saumure des fromages à pâte molle, un pH de l'ordre de 4,6 pendant toute la durée d'utilisation du bain.

Cette acidification doit s'effectuer à chaque fois que commence l'utilisation d'une saumure neuve, mais devient ensuite inutile par suite de "l'effet tampon" du sérum qui, quelle que soit la valeur du pH originel de la saumure, stabilise ce pH vers 4,6. Les valeurs du pH des saumures après saumurage comparées aux valeurs avant saumurage, consignées dans le tableau 5, en apportent la confirmation.

Quelques publications font état, pour divers types de fromages, d'une valeur optimum de pH de la saumure. Ainsi KERIMOV (64) pense qu'il existe un pH "idéal" pour chaque type de fromage et donne la valeur 4,7 pour le Brinza et 5,2 pour le Tushino. Pour les fromages Gouda et Edam, cet optimum se situerait entre 4,6 et 4,8 (76, 136).

La fixation d'une température et d'un pH a comme autres avantages

d'éliminer dans la pratique, les variations de l'absorption de sel et de la déshydratation liées à ces deux facteurs. L'utilisation d'une saumure saturée et agitée va dans le même sens en permettant de standardiser au mieux le taux de sel souhaité dans le produit.

Une telle saumure permet, en outre, de limiter la survie des microorganismes contaminants, et de raccourcir notablement les durées de salage.

Si dans nos saumures expérimentales, cette agitation a été obtenue mécaniquement, il existe de nombreuses installations industrielles permettant une circulation de la saumure qui atteint les mêmes buts (72). En outre, la mise en place dans le circuit d'un bac de dissolution du sel ou la présence dans le bain de saumure d'un lit de sel facilitent le maintien de la saturation, pendant toute la durée du saumurage.

Si cette première partie de notre travail a eu pour but d'étudier l'influence de la "qualité" de la saumure sur l'absorption de sel et l'affinage du Camembert, la deuxième partie que nous allons maintenant aborder nous permettra d'étudier l'influence de la "qualité" du fromage ainsi que l'importance du facteur "temps" sur cette même absorption de sel.

3.2. SALAGE PAR SAUMURAGE

3.2.1. Calcul du coefficient de diffusion du sel dans l'eau du fromage

Dès que le fromage est mis dans la saumure, le sel migre lentement à l'intérieur et, en même temps, de l'eau tend à s'échapper.

Les transferts de matière par diffusion sont définis par la loi de FICK :

$$F = - D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Equ. 1})$$

où :

- F est le taux de transfert par unité de surface
- c est la concentration de substance diffusante au point x mesuré perpendiculairement à la surface
- D est le coefficient de diffusion de la substance considérée

Dans le cas de produits constitués de plusieurs phases, la substance ne peut diffuser que dans la phase dans laquelle elle est soluble. En conséquence, la diffusion du sel dans le fromage doit être représentée par le coefficient de diffusion du sel dans l'eau du fromage. De plus, les concentrations en NaCl doivent être exprimées par rapport à l'eau du fromage et non par rapport à la masse totale.

Par ailleurs, le fromage étant limité par deux faces planes et une face cylindrique, il est nécessaire de résoudre l'équation 1 pour chacune de ces surfaces. Le cas d'un fromage limité par une surface sphérique sera étudié plus loin.

- a) La solution de la loi de FICK dans le cas d'une diffusion au travers d'une surface plane dans un milieu de dimensions infinies s'écrit (20) :

$$\frac{\Delta C}{\Delta C_0} = \frac{C - c}{C - c_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right) \quad (\text{Equ. 2})$$

où :

- erf est la "fonction d'erreur" définie par

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^u e^{-u^2} \cdot du$$

- c est la concentration en sel (grammes pour 100 grammes d'eau) à la distance x (cm) de la surface de pénétration, ou plan de référence définie par un gradient de concentration nul.
- C est la concentration en sel de la saumure (grammes pour 100 grammes d'eau).
- c₀ est la concentration initiale en sel dans l'eau du fromage (grammes pour 100 grammes d'eau).

t est la durée de saumurage en jours

D est, dans ces conditions, le coefficient de diffusion du sel dans l'eau du fromage, exprimé en cm²/jour.

- b) Dans le cas de la diffusion dans un cylindre de longueur infinie, la solution de la loi FICK s'écrit (20) :

$$\frac{\Delta C}{\Delta C_0} = \frac{C - c}{C - c_0} = 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{J_0 \left(B_n \cdot \frac{R}{R_{\max}} \right)}{B_n \cdot J_1(B_n)} \cdot e^{-B_n^2 \cdot F_0} \quad (\text{Equ. 3})$$

où :

F_0 est le nombre de FOURIER - matière = $\frac{D \cdot t}{R_{\max}^2}$

J_0 et J_1 sont les "fonctions de BESSEL" de première espèce d'ordre respectivement 0 et 1.

B_n est la nième racine de l'équation $J_0(B_n) = 0$.

$R_{\max}$ est le rayon du cylindre considéré soit 5,5 cm dans le cas du Camembert.

c est la concentration au niveau d'une couche cylindrique interne de rayon R .

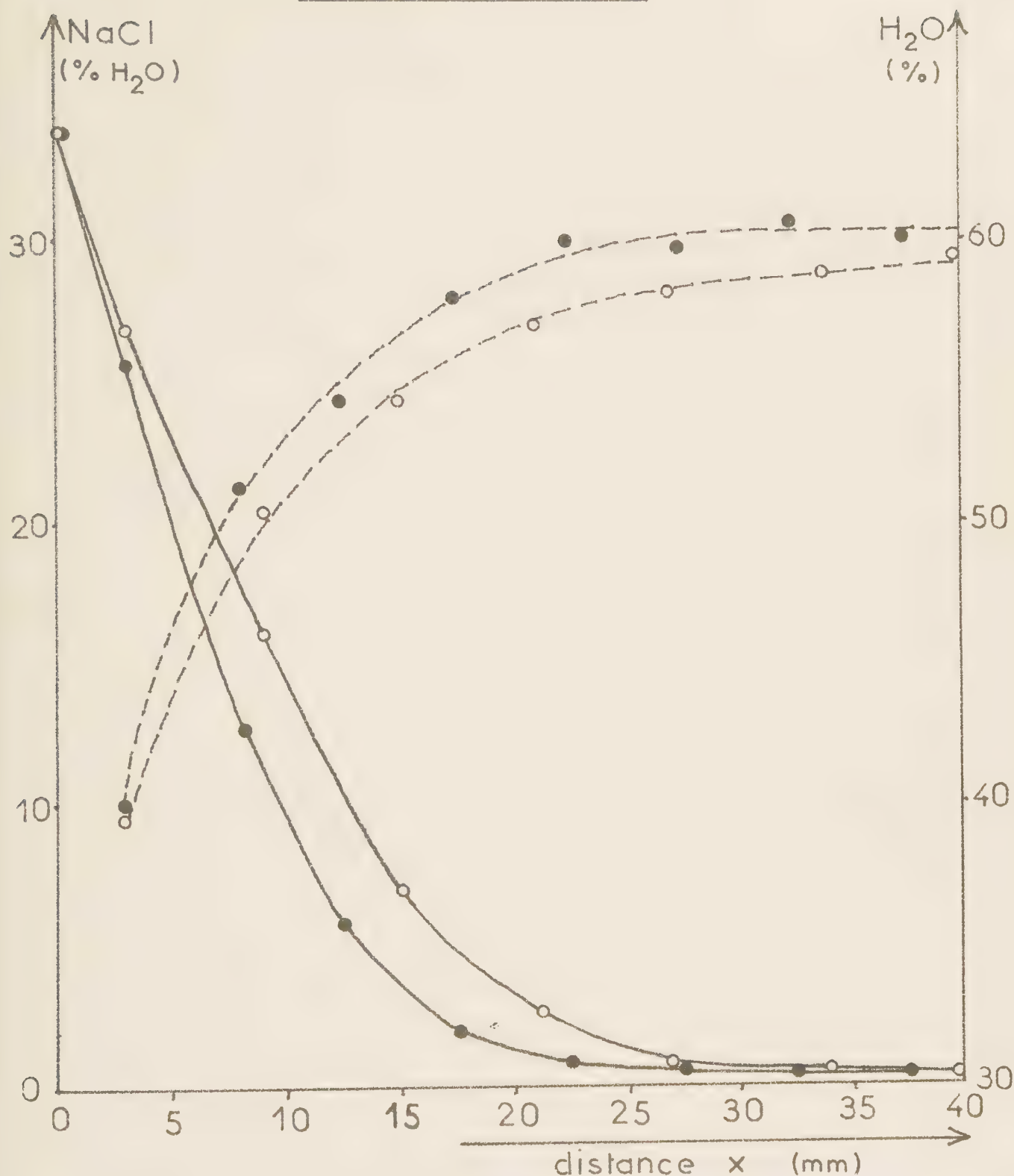
C , c_0 , D , t ont été définis précédemment.

Ces deux formules sont applicables à nos résultats expérimentaux concernant le salage des "doubles-fromages" car dans le temps de saumurage considéré (22 h), il n'y a pas de superposition des 2 sens de diffusion dans les parties utilisées pour les mesures.

La détermination de la valeur du coefficient de diffusion verticale D_v (surface plane) à partir des mesures expérimentales de concentration (figure 12) a été effectuée en utilisant une table (cf. annexe 1) donnant les valeurs numériques de la "fonction d'erreur".

Le coefficient de diffusion horizontale D_h (surface cylindrique) a été déterminé au moyen d'une abaque (cf. annexe 2) permettant de calculer

Fig. 12 _ Migration du sel et de l'eau
pendant le salage.



Humidité du fromage av. salage: 59,51 %
Concentration de la saumure : 33,9% H₂O
Température : 14°C
Durée de saumurage : 22 h

Sel { ○ — ○ horizontal.
 ● — ● vertical.
Eau { ○ - - - ○ horizontal.
 ● - - - ● vertical.

le nombre de FOURIER en fonction de $\frac{\Delta C}{\Delta C_0}$ d'une part et de $R/R_{\max}$ d'autre part.

Les tranches de fromage analysées ne pouvant être d'épaisseur négligeable, il paraissait possible de commettre une erreur sur la détermination des coefficients de diffusion. En effet, nos valeurs expérimentales correspondent à une moyenne pour l'ensemble de la tranche analysée, alors que les équations précédentes sont valables pour des concentrations ponctuelles.

Aussi, avons-nous vérifié la valeur de D_v déterminée par l'équation 2 en utilisant la formule suivante, d'après CRANK (20), qui est obtenue par intégration selon x de l'équation 2 :

$$M_t^V = 2 C \cdot \sqrt{\frac{D_v \cdot t}{\pi}} \quad (\text{Equ. 4})$$

où :

M_t^V (%.cm) représente la masse totale de sel prise par le milieu au bout du temps t . Cette masse peut être déterminée, par ailleurs, en effectuant la somme des taux de sel réellement pris par chaque tranche :

$$M_t^V = \sum_0^i (S_i - c_0) \cdot \Delta x_i \quad (\text{Equation 5})$$

où :

S_i représente le taux de sel moyen mesuré dans une tranche d'épaisseur Δx_i (cm).

lors de la diffusion dans un cylindre, l'intégration de l'équation 3 selon R conduit à la formule suivante (20) :

$$\frac{M_t^h}{M_\infty^h} = 1 - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{4 \cdot e^{-B_n^2 \cdot Fo}}{R_{\max}^2 \cdot B_n^2} \quad (\text{Equ. 6})$$

où :

M_∞^h représente la quantité totale de sel qui serait prise par le cylindre au bout d'un temps infini.

Cette formule est beaucoup plus difficile d'utilisation et, s'il existe une approximation valable pour les temps courts (cf. § 3.2.5.) celle-ci n'est pas applicable pour les durées de l'ordre de 22 heures.

Aussi, la vérification par cette équation de la valeur D_h obtenue par l'équation 3 n'a pu être effectuée.

Le tableau 8 regroupe l'ensemble des valeurs des coefficients de diffusion D_v déterminés par les équations 2 et 4 et D_h déterminées par l'équation 3.

les valeurs de D_v calculées par les deux méthodes sont très voisines (0,44 et 0,43 cm^2/j). L'épaisseur des tranches n'influence donc pas, de manière sensible, la détermination de D_v . L'épaisseur des tranches utilisées pour le calcul du coefficient de diffusion horizontale étant identique, nous pouvons admettre que la valeur D_h obtenue (0,61 cm^2/j) est également valable.

Deux autres expériences réalisées avec des "double-fromages" présentant une humidité initiale comparable nous ont conduit à des valeurs très voisines pour D_v (respectivement 0,42 et 0,45) et D_h (respectivement 0,58 et 0,63).

Ces valeurs concordent bien avec les valeurs théoriques de

Tableau 8 CALCUL DES COEFFICIENTS DE DIFFUSION VERTICALE (Dv)
ET HORIZONTALE (Dh)

- G/S du fromage 45,14%
- Humidité du fromage non salé 59,51 %
- Concentration de la saumure agitée : C = 33,9 (% H₂O)
- Concentration initiale du fromage : Co = 0,45 (% H₂O)
- Durée du saumurage t = 22 h
- Température de saumurage : 14°C
- pH de la saumure : 4,6

DIFFUSION VERTICALE (Surface plane)			DIFFUSION HORIZONTALE (Surface cylindrique)		
Distance x (cm)	NaCl (%H ₂ O)	Dv (cm ² /j)	Rayon R (cm)	NaCl (%H ₂ O)	Dh (cm ² /j)
0,3	25,57	0,463	5,2	26,91	0,561
0,8	12,81	0,424	4,6	16,04	0,660
1,25	5,79	0,452	4,0	7,05	0,594
1,75	2,10	0,433	3,4	2,69	0,594
2,5	1,02	0,438	2,8	0,87	0,627
2,75	0,51	N.C.	2,1	0,72	N.C.
3,25	0,42	N.C.	1,5	0,45	N.C.
3,75	0,44	N.C.	0,9	0,42	N.C.
4,25	0,43	N.C.	0,3	0,44	N.C.
4,75	0,47	N.C.			
5,25	0,42	N.C.			
Dv moyen : 0,442			Dh moyen : 0,607		
Dv calculé par l'équation 4 : 0,431					

N.C. : coefficient non calculable

GEURTS (38) pour le taux d'humidité initiale (59,51 %) et le taux de gras sur sec (45,14 %) des fromages. En effet, par extrapolation des courbes de la figure 9 de sa publication, le coefficient de diffusion dans l'eau se situerait vers $0,5 \text{ cm}^2/\text{j}$.

C'est une valeur assez éloignée du coefficient de diffusion du sel dans l'eau pure qui est voisin de $1,1 \text{ cm}^2/\text{j}$ selon les déterminations effectuées par GORDON cité par JOST (59).

les raisons de l'écart enregistré sont, selon GEURTS, les suivantes :

- a) La sortie de l'eau du fromage fait varier le plan de référence défini par un gradient de concentration nul. Ce plan se situerait à l'extérieur du fromage, et, puisque c'est la surface du fromage qui est prise comme surface de référence ($x = 0$), il estime que la valeur calculée est entachée d'une erreur par défaut.
- b) Toute l'eau du fromage ne participe pas au processus de diffusion, car environ 10 % de celle-ci est liée à la paracaséine (99) et n'est pas un solvant du chlorure de sodium.
- c) La viscosité de l'eau du fromage est supérieure à celle de l'eau pure et tend à freiner le processus de diffusion.
- d) Bien que l'on considère que la migration du sel se fasse dans l'eau du fromage, cette diffusion n'est pas rigoureusement linéaire en raison d'obstructions dues aux globules de matière grasse et aux particules de protéines. Il en résulte que le coefficient de diffusion dans l'eau du fromage sera dépendant du taux de matières grasses et du taux de matières sèches du fromage.

Pour notre part, nous pensons que la diffusion du sel peut encore

être perturbée lorsque la pâte du fromage présente des irrégularités de texture (trous). Dans ce cas, des transferts par convection peuvent également se produire et tendre alors à augmenter le coefficient de diffusion calculé.

C'est pourquoi, comme l'indique GEURTS, les coefficients de diffusion dans l'eau du fromage sont des coefficients de diffusion apparents ou pour reprendre le terme qu'il utilise, des coefficients de pseudo-diffusion.

3.2.2. Influence de la texture

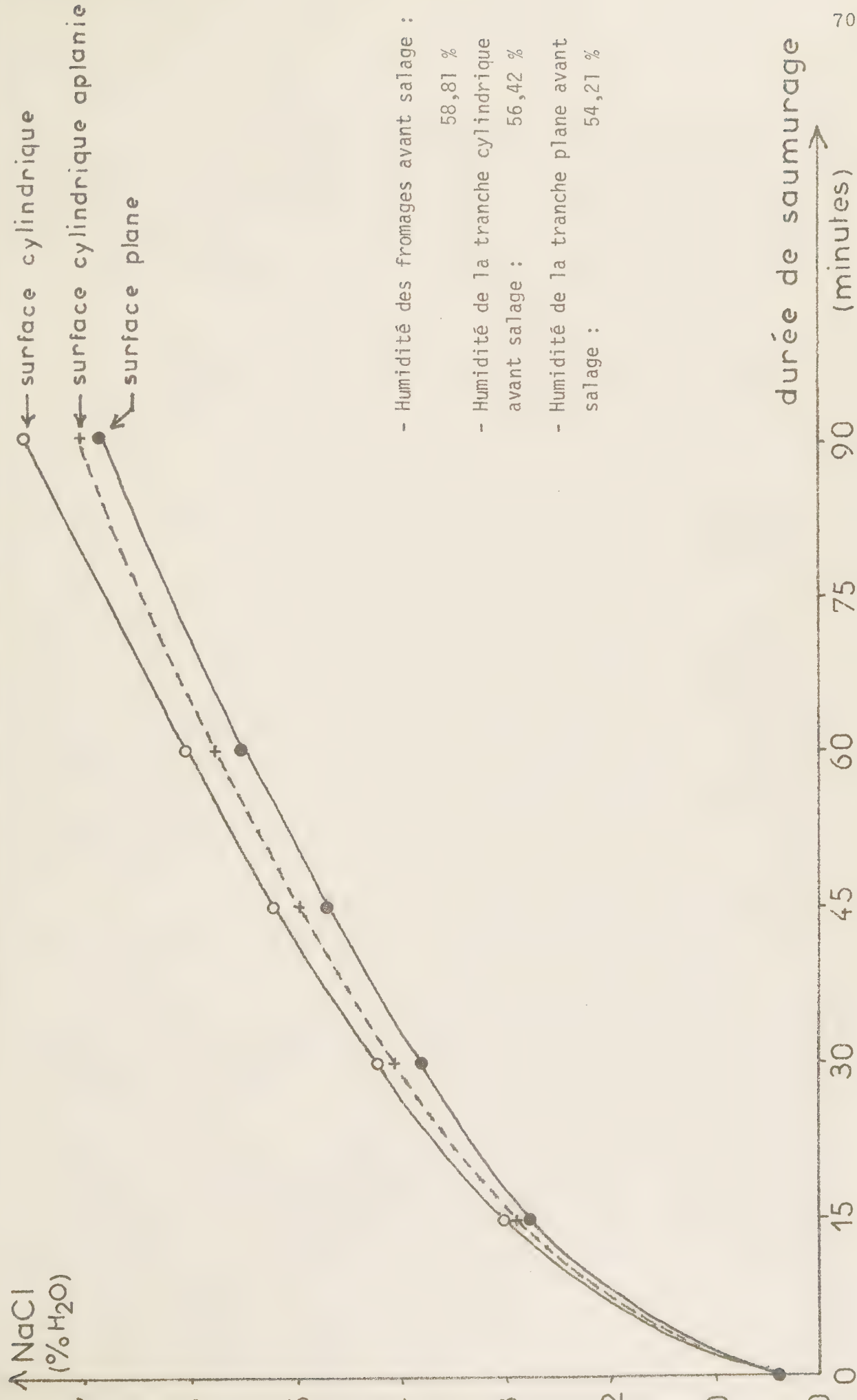
Dans le cas des pâtes molles, nous trouvons des valeurs sensiblement différentes pour les coefficients D_v et D_h . Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par l'allure des courbes présentées sur la figure 13 où la prise de sel est plus importante par la surface cylindrique que par la surface plane.

Une première explication peut être tirée du point a) des causes précédemment définies par GEURTS. En effet, la surface cylindrique d'un fromage de type Camembert n'est jamais parfaitement plane ; il existe des anfractuosités dues au moulage qui entraînent une variation du plan de référence, celui-ci devant se situer beaucoup plus près de la surface cylindrique que de la surface plane.

Les mesures de prise de sel que nous avons effectuées (figure 13) confirment cette première hypothèse : l'absorption de sel est plus faible lorsque la surface cylindrique a été découpée de façon à éliminer la couche comportant les irrégularités. Toutefois, elle reste supérieure à la prise de sel par la surface plane.

Une deuxième cause de variation existe donc. Elle est liée essentiellement à des différences de texture du fromage selon le sens de diffusion. VUJICIC (147) a démontré par des mesures de consistance, dans le cas du Kaschkawal, l'existence d'une structure en couches qui influence la pénétration du sel.

Fig. 13 - Absorption de sel par les couches de surface (épaisseur : 7mm).



Il est notable que, dans le cas du Camembert, cette structure stratifiée existe ; la rupture relativement aisée d'un fromage non affiné selon des plans sensiblement parallèles aux surfaces planes en apporte la confirmation. Les anfractuosités sur la surface cylindrique seraient, elles-mêmes, la conséquence visible de cette structure stratifiée (figure 14).

Une troisième explication sera fournie dans le paragraphe suivant : il s'agit de l'influence de l'humidité des couches de surface.

3.2.3. Influence de la répartition initiale de l'humidité

3.2.3.1. Diffusion verticale

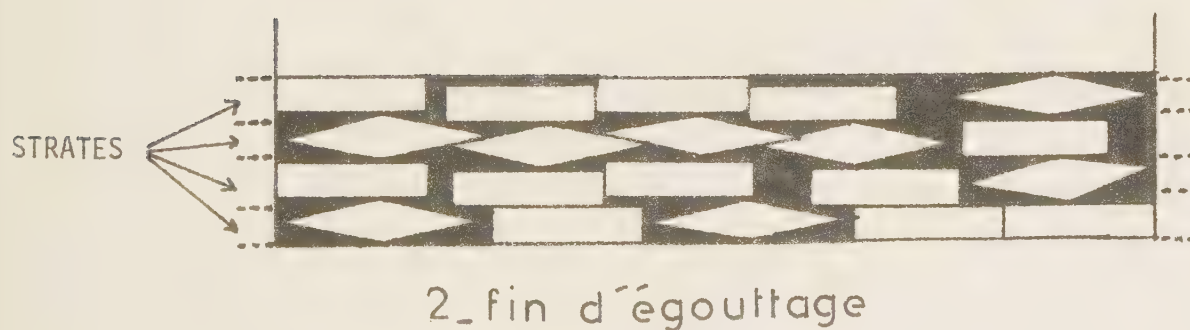
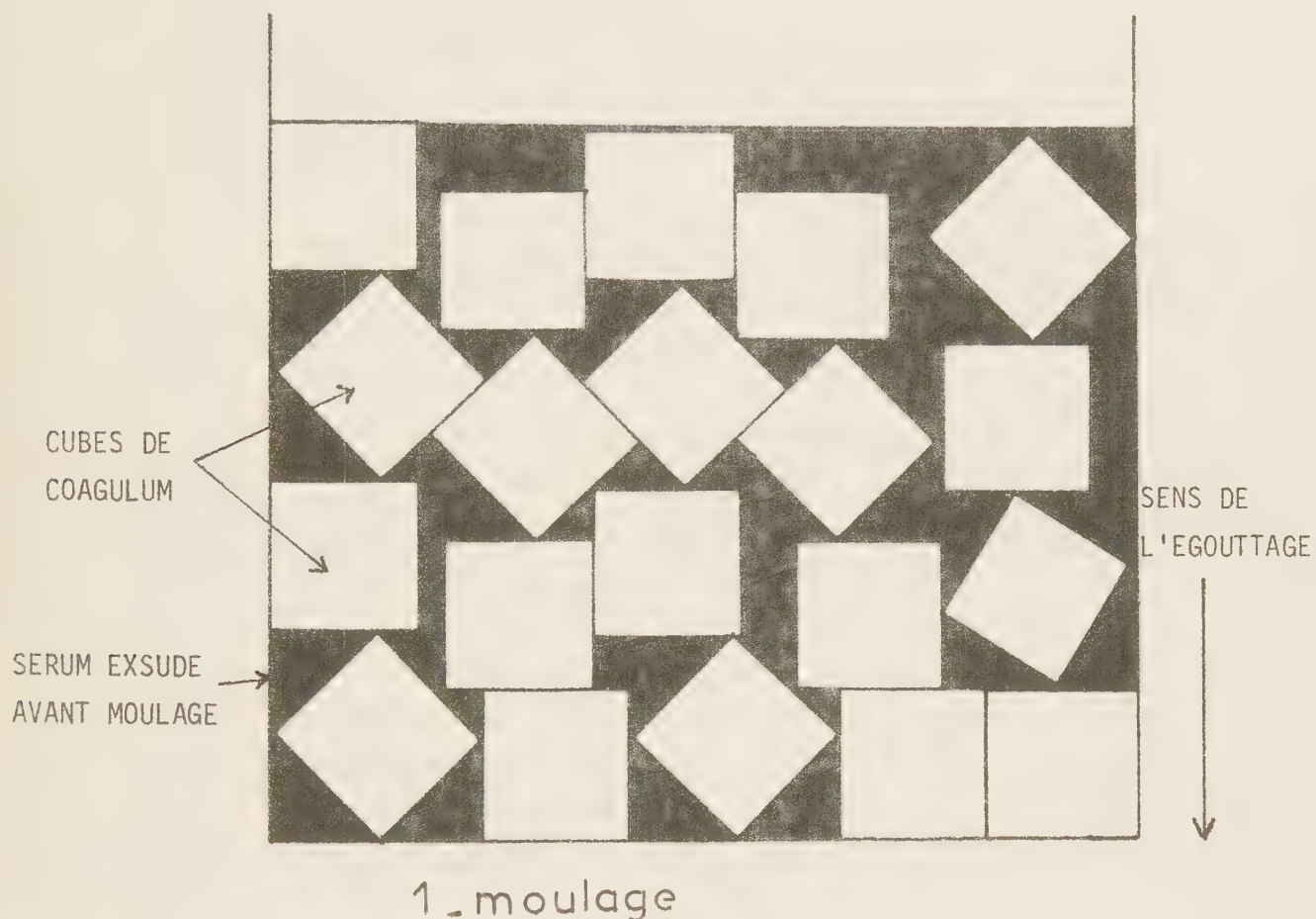
A partir des valeurs expérimentales d'absorption de sel, pendant des durées comprises entre 15 et 90 mn, par une tranche de surface d'épaisseur 7 mm (figure 13), nous avons calculé la masse totale de sel M_t^V (% . cm) réellement prise par cette surface. La détermination de cette masse à l'aide de l'équation 5 est possible car, dans ce temps de saumurage, tout le sel qui a pénétré se trouve concentré dans cette couche (cf. § 3.2.4.).

L'application de l'équation 4 nous permet alors de tirer la valeur de D_v pour ces courtes durées de saumurage.

Nous obtenons une valeur moyenne $D_v = 0,20 \text{ cm}^2/\text{j}$ avec comme valeurs extrêmes $0,18 \text{ cm}^2/\text{j}$ à 15 mn et $0,23 \text{ cm}^2/\text{j}$ à 90 mn de saumurage (tableau 9).

Nous constatons donc que la valeur du coefficient de diffusion déterminée en début de saumurage est largement inférieure à la valeur obtenue après 22 heures. Il apparaît ainsi que la diffusion du sel est, dans la période initiale du saumurage, perturbée par

Fig. 14 _ Représentation schématique
de la formation de la structure
stratifiée du Camembert. (HYPOTHESE)



des mécanismes qui tendent à la ralentir. Sur une longue période comme celle que nous avons appliquée dans le cas du salage des "doubles-fromages", ces phénomènes présentent peu d'importance et les coefficients alors calculés ($D_v = 0,44 \text{ cm}^2/\text{j}$ et $D_n = 0,61 \text{ cm}^2/\text{j}$) représentent bien la diffusion du sel dans la pâte.

Pendant les courtes durées de saumurage, la seule partie du fromage qui est concernée par le processus de diffusion se trouve avoir une épaisseur très faible (cf § 3.2.4.).

L'humidité à prendre en compte doit donc être la concentration initiale en eau de la couche dans laquelle le sel a pénétré. Cette concentration était de 54,21 % (mesure effectuée avant saumurage) alors que l'humidité moyenne du fromage était de 58,81 %.

Dans ces conditions, le coefficient de diffusion tiré de la publication de GEURTS serait d'environ $0,3 \text{ cm}^2/\text{j}$. L'écart avec notre valeur moyenne peut s'expliquer par le fait que le taux d'humidité considéré ne représente encore qu'une valeur moyenne et qu'il existe à l'intérieur de la tranche elle-même un gradient de concentration en eau.

Ceci est confirmé par l'augmentation progressive de la valeur D_v , à mesure que le sel pénètre dans la pâte (tableau 9).

3.2.3.2. Diffusion horizontale

L'équation 6 étant d'application difficile, nous avons assimilé la surface cylindrique à une surface plane de manière à pouvoir appliquer l'équation 4 dans le cas de la pénétration du sel au travers de la surface cylindrique.

Cette approximation nous a paru possible compte-tenu du très faible niveau de pénétration du sel à la fin des courtes

durées de saumurage.

Nous obtenons alors un D_h moyen égal à $0,25 \text{ cm}^2/\text{j}$ avec comme valeurs extrêmes $0,23$ et $0,28 \text{ cm}^2/\text{j}$. (tableau 7). Cette valeur n'est pas très éloignée de la valeur théorique de GEURTS qui, pour le taux d'humidité de cette tranche (56,42 %) serait de $0,34 \text{ cm}^2/\text{j}$ environ.

Comme dans le cas de la diffusion verticale, l'écart peut encore s'expliquer par l'existence d'un gradient de concentration en eau dans la couche où le sel a pénétré.

En définitive, les coefficients de diffusion du sel dans le cas du Camembert ne sont pas constants en raison de l'existence d'un gradient de concentration en eau dans le fromage après démoulage, les parties superficielles étant toujours plus sèches que les parties centrales.

De plus, les différences d'humidité entre la surface plane et la surface cylindrique expliquent l'écart enregistré entre D_v et D_h pour les temps de saumurage normaux du Camembert. Il est, toutefois, probable que cette différence d'humidité soit elle-même une conséquence de la structure stratifiée du fromage.

Les valeurs D_v et D_h déterminées après 22 heures de saumurage sont représentatives de la diffusion dans le fromage entier. La pénétration du sel s'étant alors effectuée sur une grande profondeur, le gradient initial de concentration en eau n'a plus qu'un effet secondaire.

La courbe de la figure 15 sur laquelle nous avons reporté toutes les valeurs de D_v déterminées ainsi que 3 autres valeurs obtenues après 6, 12 et 18 heures de saumurage d'un "double-fromage" découpé selon la méthode A montre la stabilisation du coefficient de diffusion D_v vers $0,45 \text{ cm}^2/\text{j}$ et du coefficient de diffusion D_h vers $0,60 \text{ cm}^2/\text{j}$.

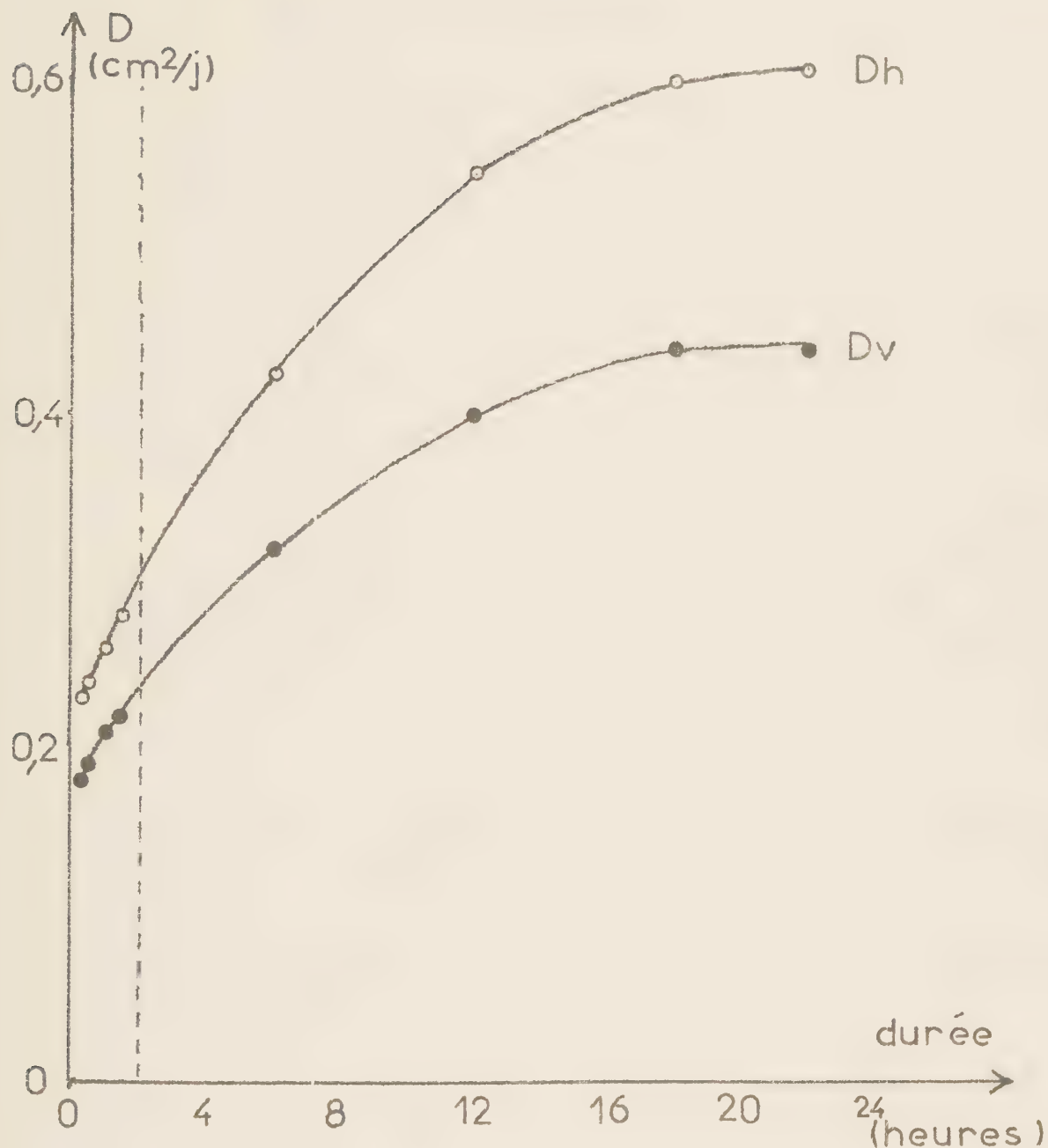
Tableau 9 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSION POUR LES
COURTES DUREES DE SAUMURAGE

DUREE (mn)	DIFFUSION VERTICALE			DIFFUSION HORIZONTALE		
	NaCl (% H2O)	Mt (% cm)	Dv (cm ² /j)	NaCl (% H2O)	Mt (% cm)	Dv (cm ² /j)
15	2,79	1,67	0,18	3,07	1,87	0,23
30	3,84	2,41	0,19	4,26	2,70	0,24
45	4,74	3,04	0,20	5,24	3,39	0,25
60	5,58	3,63	0,21	6,13	4,01	0,26
90	6,93	4,57	0,22	7,67	5,09	0,28

Tableau 10 REPARTITION DU SEL (% H2O) A PARTIR DE LA SURFACE PLANE POUR
DIVERSES DUREES DE SAUMURAGE DU CAMEMBERT - CONCENTRATION DE
LA SAUMURE : 33,9 % - CONCENTRATION INITIALE DU FROMAGE : 0,4 %

DISTANCE (mm)	DUREE DE SAUMURAGE (mn)				
	15	30	45	60	90
0,5	16,5	21,2	23,8	25,6	26,2
1	5,7	11,2	15,1	18,2	18,8
2	0,6	2,0	4,4	6,4	8,4
3	0,4	0,5	1,1	2,1	2,9
4	0,4	0,4	0,5	0,7	1,1
5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Fig.15 Influence de la durée de saumurage
sur les coefficients D_v et D_h .



Humidité des fromages avant salage :

- saumurages courts : 58,92 % $\sigma = 0,49$ %
- saumurages longs (double-fromages) :
59,51 % $\sigma = 0,63$ %

3.2.4. Niveau de pénétration du sel en fin de saumurage

Les coefficients de diffusion indiqués dans le tableau 9 pour des durées de saumurage communément utilisées pour le Camembert ont été utilisés dans l'équation 2 pour déterminer la répartition théorique du sel à partir de la surface plane.

Les résultats regroupés dans le tableau 10 montrent que, dans le temps de saumurage du Camembert, la migration du sel n'est plus décelable au-delà de 5 mm. Les valeurs de D_h étant peu différentes, les résultats seraient sensiblement les mêmes.

Une constatation s'impose donc : lorsque débute l'affinage, la plus grande partie de la pâte est libre de sel. C'est pendant la maturation du fromage que le sel se répand dans toute la masse. L'étude de cette migration fera l'objet de la 3ème partie de notre rapport.

3.2.5. Influence de la durée de saumurage sur l'absorption de sel par le fromage entier

L'absorption de sel par la surface plane M_t^V peut être représentée par l'équation 4:

$$M_t^V = 2 C \cdot \sqrt{\frac{D_v \cdot t}{\pi}}$$

Ayant montré la variation de D_v en fonction du temps, cette équation ne peut être qu'une approximation. En effet, elle est obtenue par intégration de l'équation 2 selon x . Cette dernière équation n'est valable que si le coefficient de diffusion est constant selon la distance de pénétration et par conséquent selon le temps.

L'équation 4 ne peut donc être utilisée que pour une répartition initiale de l'humidité parfaitement homogène, ce qui, en toute hypothèse, ne pourrait être obtenu qu'en laissant reposer le fromage pendant une longue durée avant de le mettre en saumure.

Cette réserve étant faite, nous admettrons pour la suite de notre étude que, dans le cas des saumurages courts, D_v ne varie pas avec le temps, et nous utiliserons la valeur moyenne déterminée entre 15 et 90 mn, soit $0,20 \text{ cm}^2/\text{j}$.

La même approximation sera effectuée pour D_h et nous prendrons comme valeur moyenne $D_h = 0,25 \text{ cm}^2/\text{j}$.

L'absorption de sel par la surface cylindrique est représentée par l'équation 6. CARSTEN et Mc KERROW, cités par CRANK (20), ont effectué un développement en série de cette équation lorsque t est petit. Ils obtiennent :

$$\frac{M_t^h}{M_\infty^h} = \frac{4}{(\pi)^{1/2}} \cdot \left(\frac{D_h \cdot t}{R_{\max}^2} \right)^{1/2} - \left(\frac{D_h \cdot t}{R_{\max}^2} \right) - \frac{1}{3(\pi)^{1/2}} \left(\frac{D_h \cdot t}{R_{\max}^2} \right)^{3/2} + \dots$$

(Equ. 7)

Lorsque D_h est petit, les termes de rang 2, 3, ... peuvent être négligés et l'absorption de sel par la surface cylindrique s'écrit alors :

$$\frac{M_t^h}{M_\infty^h} = \frac{4}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_h \cdot t}{\pi}} \quad (\text{Equ. 8})$$

On trouve également dans CRANK la loi de diffusion au travers d'une surface sphérique :

$$\frac{\Delta c}{\Delta c_0} = \frac{C - c}{C - c_0} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot (-1)^{n+1} \cdot \frac{\sin(n\pi \frac{R}{R_{\max}})}{n \cdot \pi \cdot \frac{R}{R_{\max}}} \cdot e^{-(n\pi)^2 \cdot Fo}$$

(Equ. 9)

L'intégration de cette équation selon R permet de déterminer la quantité de substance qui a pénétré au travers de la surface sphérique:

$$\frac{M_t^S}{M_{\infty}^S} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-(n\pi)^2 \cdot Fo}$$

(Equ. 10)

Lorsque t est petit, cette équation peut s'écrire :

$$\frac{M_t^S}{M_{\infty}^S} = 6 \left(\frac{D_s \cdot t}{R_{\max}^2} \right)^{1/2} \left(\pi^{-1/2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \text{ierfc} \frac{n R_{\max}}{\sqrt{D_s \cdot t}} \right) - 3 \frac{D_s \cdot t}{R_{\max}^2}$$

(Equ. 11)

Dans cette équation ierfc est, selon la notation de CARSLAW

et JAEGER cités par CRANK, la "fonction d'erreur complément intégrée" et est définie par $\text{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u(1 - \text{erf}(u))$

Si D_s est petit, l'équation 11 peut être réduite à son premier terme et nous obtenons alors :

$$\frac{M_t^s}{M_\infty^s} = 6 \left(\frac{D_s \cdot t}{R_{\max}^2} \right)^{1/2} \cdot \pi^{-1/2} = \frac{6}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_s \cdot t}{\pi}}$$

(Equ. 12)

Nous avons donc à notre disposition 3 équations de base (équ. 4, 8, 12) nous permettant de décrire l'absorption de sel par diverses surfaces.

Il est ensuite aisé de déterminer les taux de sel moyens qui seraient obtenus dans le fromage par diffusion au travers d'une surface déterminée.

a) Diffusion par une surface plane.

Le taux de sel moyen S_t^v est égal à $\frac{M_t^v}{h} = \frac{2C}{h} \cdot \sqrt{\frac{D_v \cdot t}{\pi}}$

(équ. 13) où h est l'épaisseur du fromage.

b) Diffusion par une surface cylindrique.

$$\frac{S_t^h}{S_\infty^h} = \frac{M_t^h}{M_\infty^h} = \frac{4}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_h \cdot t}{\pi}}$$

Le taux de sel S_{∞}^h obtenu dans l'humidité du fromage au bout d'un temps de saumurage infini serait évidemment égal à la concentration de la saumure C , d'où :

$$S_t^h = \frac{4C}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_h \cdot t}{\pi}} \quad (\text{Equ. 14})$$

c) Diffusion par une surface sphérique.

$$\frac{S_t^s}{S_{\infty}^s} = \frac{6}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_s \cdot t}{\pi}}$$

S_{∞}^s étant égal à C , nous tirons :

$$S_t^s = \frac{6C}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_s \cdot t}{\pi}} \quad (\text{Equ. 15})$$

le taux de sel théorique S d'un fromage saumuré par toutes ses faces sera égal, en réalité, à la somme des taux de sel obtenus par chacune des surfaces. Cependant, il faut remarquer que cette égalité n'est valable que s'il n'y a pas superposition des sens de diffusion. Ceci est vrai si la profondeur de pénétration est faible par rapport aux dimensions du fromage, ce qui est le cas pour le Camembert salé pendant des durées normales.

Nous aurons donc pour un fromage cylindrique tel que le Camembert :

$$S = 2 S_t^v + S_t^h + c_0$$

où c_0 est le taux de sel initial du fromage.

L'équation d'absorption de sel en fonction du temps s'écrit donc :

$$S = \frac{4C}{h} \cdot \sqrt{\frac{D_v \cdot t}{\pi}} + \frac{4C}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{D_h \cdot t}{\pi}} + c_0$$

(Equ. 16)

Si : C est exprimé en grammes de sel pour 100 grammes d'eau

D_v et D_h sont exprimés en cm^2/j

t est exprimé en jours ou fractions décimales de jours

h et $R_{\max}$ sont exprimés en cm

c_0 est exprimé en grammes de sel pour 100 grammes d'eau.

S sera alors exprimé en grammes de sel pour 100 grammes d'eau du fromage.

Dans le cas où $D_v = D_h = D$, c'est-à-dire, lorsque le fromage est bien homogène, l'équation 16 peut s'écrire :

$$S = 2C \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \cdot \left(\frac{2}{h} + \frac{2}{R_{\max}} \right) + c_0$$

Si nous remarquons que :

$$\frac{2}{h} + \frac{2}{R_{\max}} = \frac{2R_{\max} + 2h}{h \cdot R_{\max}} = \frac{2\pi R_{\max}^2 + 2\pi h R_{\max}}{\pi h R_{\max}^2} = \frac{\text{surface du fromage}}{\text{volume du fromage}} = sp$$

Nous obtenons en définitive :

$$S = 2C \cdot sp \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} + c_0$$

(Equ. 17)

où s_p est la surface spécifique du fromage.

Pour un fromage parallélépipédique (Carré de l'Est par exemple)
le taux de sel moyen sera égal à :

$$S = 2 S_t^1 + 2 S_t^2 + 2 S_t^3 + c_0$$

où S^1, S^2, S^3 sont les taux de sel obtenus au travers de faces 1, 2, 3.

Si le fromage a comme caractéristiques dimensionnelles a, b, c
et si le coefficient de diffusion est identique pour toutes les faces,
nous aurons :

$$S = 2C \cdot \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \cdot \left[\frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{2}{c} \right] + c_0$$

La surface spécifique s_p de ce fromage étant égale à

$$\frac{2ab + 2ac + 2bc}{abc} = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{2}{c} \quad \text{nous obtenons encore :}$$

$$S = 2C \cdot s_p \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} + c_0 \quad (\text{Equ. 17})$$

Pour un fromage sphérique, nous avons :

$$S = S_t^s + c_0$$

soit :

$$S = \frac{6C}{R_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{Ds \cdot t}{\pi}} + c_0$$

Nous remarquons que $\frac{3}{R_{\max}} = \frac{4\pi R_{\max}^2}{4/3\pi R_{\max}^3} = sp$

d'où $S = 2C \cdot sp \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} + co$ (Equ. 17)

Il apparaît donc que, quelle que soit la forme du fromage, l'équation finale qui représente le taux de sel obtenu au bout d'un temps déterminé est toujours la même.

Il convient toutefois de rappeler que cette équation a été obtenue après avoir effectué les approximations suivantes :

- Coefficients de diffusion supposés constants pendant la durée du saumurage, ce qui n'est pas tout à fait exact comme nous l'avons montré dans le paragraphe 3.2.3.
- Approximation de CARSTEN et Mc KERROW pour les temps courts.
- Elimination des termes de rang supérieur à 1 dans les équations 7 et 11. Un calcul plus précis nous a montré qu'effectivement ces termes pouvaient être négligés, leur valeur étant inférieure à la précision de la méthode de dosage des chlorures.
- Pas de superposition des sens de diffusion. Cette approximation nous a permis d'effectuer la somme algébrique des taux de sel qui seraient obtenus par chacune des surfaces prises indépendamment. Elle est valable dans la mesure où les profondeurs de pénétration sont faibles par rapport aux dimensions de fromages.
- Coefficients de diffusion supposés identiques pour toutes les faces, ce qui n'est pas tout à fait exact comme nous l'avons montré dans le paragraphe 3.2.2.

Toutefois, si D_v et D_h sont très différents, il est possible de trouver un coefficient moyen pondéré D_m en appliquant les relations suivantes tirées de l'équation 16 :

$$\frac{\sqrt{D_v}}{h} + \frac{\sqrt{D_h}}{R_{\max}} = \sqrt{D_m} \cdot \left[\frac{1}{h} + \frac{1}{R_{\max}} \right]$$

qui nous conduit à :

$$\sqrt{D_m} = \frac{R_{\max} \sqrt{D_v} + h \sqrt{D_h}}{R_{\max} + h} = \frac{2\pi R_{\max}^2 \sqrt{D_v} + 2\pi R_{\max} h \sqrt{D_h}}{2\pi R_{\max}^2 + 2\pi R_{\max} \cdot h} = \frac{\sigma_p \cdot \sqrt{D_v} + \sigma_c \cdot \sqrt{D_h}}{\sigma_t}$$

(Equ. 18)

où :

σ_p représente la surface plane, σ_c la surface cylindrique et σ_t la surface totale.

Ainsi, il est clair que le coefficient de diffusion moyen est en réalité obtenu par une moyenne pondérée selon l'importance de chacune des surfaces.

Nous avons vérifié l'équation 17 pour diverses valeurs expérimentales de taux de sel obtenus lors du salage du Camembert pendant des durées variables, dans des saumures de diverses concentrations.

Le coefficient de diffusion moyen D_m , calculé à partir de l'équation 18 pour $D_v = 0,20 \text{ cm}^2/\text{j}$ et $D_h = 0,25 \text{ cm}^2/\text{j}$, est égal à : $0,22 \text{ cm}^2/\text{j}$.

Il est important de noter également que l'humidité initiale

moyenne des fromages sur lesquels les taux de sel ont été mesurés était très voisine de celle des fromages qui ont été utilisés pour la détermination de D (58,92 % et 58,81 %).

Les résultats expérimentaux et calculés à l'aide de l'équation 17 sont regroupés dans le tableau 11 et montrent l'excellent accord entre les valeurs réelles et théoriques nous permettant de conclure à la validité de l'équation 17 pour décrire l'absorption de sel par les fromages à pâte molle.

Il est probable, mais nous n'avons pu le vérifier dans le cadre de notre travail, que cette équation soit également valable pour les fromages à pâte pressée ou à pâte cuite pour lesquels le niveau de pénétration du sel en fin de saumurage serait faible par rapport aux dimensions du fromage.

Pour des fromages de petit format saumurés pendant de longues périodes (fromages affinés en saumure), certaines approximations précédentes ne sont plus valables et rendraient l'utilisation de la formule 17 incorrecte.

Tableau 11 VALEURS EXPERIMENTALES (E) ET CALCULEES (C) DES
CONCENTRATIONS EN SEL (% H₂O) DU CAMEMBERT POUR
DIVERSES DUREES DE SAUMURAGE ET DIVERSES CONCEN-
TRATIONS EN SEL DE LA SAUMURE

DUREE DE SAUMURAGE	CONCENTRATION DE LA SAUMURE (g/l et %)									
	300		250		200		150		100	
	33,9		27,2		21,4		15,7		10,2	
	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5	1,37	1,50	1,14	1,28	0,90	1,09	0,85	0,91	0,80	0,73
10	1,88	1,95	1,56	1,65	1,28	1,38	1,16	1,12	0,85	0,87
15	2,24	2,30	1,90	1,93	1,54	1,60	1,32	1,28	1,02	0,97
30	3,16	3,19	2,62	2,56	2,10	2,10	1,71	1,65	1,24	1,21
45	3,67	3,70	3,11	3,05	2,53	2,48	1,94	1,93	1,40	1,39
60	4,25	4,21	3,50	3,46	2,84	2,80	2,23	2,16	1,58	1,55
90	4,92	5,06	4,10	4,14	3,48	3,34	2,58	2,56	1,89	1,80

3.2.6. Perte d'humidité en fin de saumurage

Pendant le saumurage, une certaine quantité d'eau est perdue en même temps que du sel est absorbé par le fromage. Ces deux phénomènes simultanés entraînent une variation de poids du produit (21).

Les figures 10 et 11 montrent l'importance de la diminution des taux moyens d'humidité pendant le saumurage du Camembert. Cette variation est la résultante de la prise de sel et de la perte d'eau.

Il est possible de séparer ces deux facteurs en rapportant les taux d'humidité et les taux de sel à l'extrait sec non salé du fromage.

Les résultats pour le salage dans une saumure agitée sont reportés dans le tableau 12.

Nous constatons que le rapport perte d'eau/gain de sel ($\Delta E/\Delta S$) est approximativement constant et voisin de 1,7.

La valeur de la perte d'eau à 60 mn de saumurage (8,3 g pour 100 g d'EST non salé) peut être rapportée au fromage frais non salé (EST = 41,08 %). Nous obtenons alors une perte d'eau de 3,4 g pour 100 g de fromage, ce qui confirme les résultats déduits de nos précédents travaux (48) pour lesquels la perte d'humidité était de 3,8 g pour 100 grammes de fromage après 60 mn de saumurage.

la valeur $\frac{\Delta E}{\Delta S}$ peut être rapprochée des valeurs obtenues par

GEURTS (38) pour des fromages de type Gouda ou par BYERS et PRICE (11) pour le Brick cheese : respectivement 2,5 et 2,2.

Tableau 12

GAIN DE SEL ET PERTE D'EAU PENDANT LE SALAGE DU CAMEMBERT

DUREE DE SAUMURAGE (mn)	EAU (% EST non salé)	PERTE D'EAU (% EST non salé) ΔE	NaCl (% EST non salé)	GAIN DE NaCl (% EST non salé) ΔS	$\frac{\Delta E}{\Delta S}$
0	147,6	-	0,50	-	-
15	143,4	4,2	3,28	2,78	1,51
30	141,2	6,4	4,42	3,92	1,63
45	139,4	8,2	4,88	4,38	1,87
60	139,3	8,3	5,53	5,03	1,65
90	137,8	9,8	6,09	5,59	1,75

3.2.7. Discussion

Cette étude sur le comportement du Camembert pendant l'opération de saumurage nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- a) L'absorption de sel par le fromage peut être décrite par une loi simple si l'on connaît la valeur du coefficient de diffusion. Celui-ci est toutefois soumis à diverses causes de variation.

Nous avons montré qu'il était sensiblement plus élevé lors de la diffusion par la surface cylindrique, en raison de la présence d'irrégularités, de l'existence d'une structure stratifiée et d'une humidité plus élevée dans les couches voisines de la surface cylindrique. Il n'est pas constant pendant le processus de diffusion en raison de la présence d'un gradient de concentration en eau dans le fromage avant salage.

La formule à laquelle nous avons abouti, à partir des lois générales de la diffusion, nous a permis d'évaluer avec une bonne précision le taux de sel obtenu dans un fromage après un temps déterminé. Le coefficient de diffusion utilisé pour l'application de cette formule ($0,22 \text{ cm}^2/\text{j}$) constitue une valeur moyenne pondérée des coefficients de diffusion verticaux et horizontaux. Il convient de noter que cette valeur est très voisine de la valeur déterminée par KIRCHMEIER (71) qui pour le Camembert donne un coefficient de perméabilité au sel de $0,18 \text{ cm}^2/\text{j}$.

La principale conséquence de l'écart entre D_v et D_h est que, selon la texture du fromage, selon les méthodes de fabrication, les taux de sel obtenus après un temps de saumurage déterminé seront différents pour un même type de fromage. Cette remarque explique sans doute les écarts selon les usines dans les temps de saumurage d'un même

type de fromage.

- b) L'équation 17 peut également être appliquée à d'autres types de pâtes avec la seule réserve que la profondeur de pénétration du sel dans le temps de saumurage soit faible par rapport aux dimensions du fromage, ce qui est le cas lorsque des taux de sel d'environ 2 % dans le fromage sont recherchés. Dans ces conditions, les approximations utilisées demeurent valables. Pour les fromages affinés en saumure, il conviendrait d'utiliser les équations de base.

Toutefois, il reste à déterminer la valeur des coefficients de diffusion pour ces divers types de fromage.

GEURTS (38), a montré que le coefficient de diffusion était particulièrement influencé par le taux d'humidité et le taux de matières grasses du produit. Comme VUJICIC (146), il indique que ce coefficient est également fonction de la température, ce qui explique l'élévation des taux de sel avec la température de saumurage.

Il est clair également que le taux de sel obtenu dans le fromage est proportionnel à $\sqrt{t}$, cette relation apparaissant déjà dans les formules empiriques de ZONJI (151), VUJICIC (145, 146) et JAKUBOWSKI (55, 57).

La géométrie du fromage joue donc un rôle important par l'intermédiaire de la surface spécifique. Nous l'avons ainsi vérifié pour 3 formats particulièrement importants, et il est probable qu'il en serait de même pour toute autre forme dérivée de ces formats de base (formes pyramidales, ovales, etc ...)

Enfin, la concentration de la saumure a une influence déterminante sur l'absorption de sel et montre l'intérêt d'utiliser des saumures saturées en permanence.

La formule à laquelle nous aboutissons doit pouvoir être utilisée dans la pratique pour ajuster les durées de saumurage. Pour cela, il suffit de déterminer initialement le coefficient de diffusion global du fromage par un certain nombre de mesures expérimentales et d'utiliser la valeur moyenne obtenue pour la prévision des taux de sel en fonction du temps.

Il convient de noter que les coefficients de diffusion pratiques ainsi déterminés seraient sans doute légèrement différents des nôtres. En effet, nos fromages expérimentaux ont toujours été séchés par application d'une feuille de papier filtre après saumurage, ce qui nous éloigne sensiblement des conditions pratiques qui consistent à laisser égoutter naturellement le fromage. Dans ce cas, il doit subsister après saumurage une diffusion "résiduelle" qui est susceptible d'augmenter légèrement la valeur de D calculée à partir de l'équation 17.

- c) La quantité d'eau qui sort du fromage pendant le saumurage étant 1,7 fois plus importante que la prise de sel, il paraît nécessaire également de provoquer une agitation pendant l'opération de saumurage afin d'éviter une réduction de la concentration au voisinage du fromage.
- d) N'ayant pas dans nos expériences fait varier la teneur en eau et en matières grasses du fromage, nous n'avons pu étudier de manière précise l'influence du taux initial d'humidité du fromage sur son "égouttage" pendant le saumurage et sur le coefficient de diffusion.

Les travaux de GEURTS ont montré, dans le cas des pâtes pressées, quelle était l'importance de ces paramètres. Nous avons pu nous-mêmes entrevoir cet effet en étudiant l'influence de l'humidité des couches de surface et nous souhaitons continuer nos travaux dans ce sens pour le cas des pâtes molles.

3.3. MIGRATION DU SEL ET DE L'EAU DANS LE FROMAGE PENDANT L'AFFINAGE

Aussitôt après salage, la répartition du sel et de l'eau est loin d'être uniforme. Quel que soit le type de fromage, (le Cheddar mis à part), le sel se trouve au début de l'affinage concentré dans les couches de surface. Le processus de diffusion dans toute la masse du fromage ne peut être traité mathématiquement comme nous l'avons fait lors de l'opération de saumurage.

En effet, pendant l'affinage, la concentration du sel en surface n'est plus une constante, rendant l'investigation mathématique beaucoup plus difficile. De plus, des phénomènes secondaires apparaissent (réactions enzymatiques, migration de l'eau, superposition des 2 sens de diffusion, développement de moisissures superficielles) qui sont susceptibles d'agir sur le coefficient de diffusion ou sur sa détermination.

3.3.1. Migration après salage par saumurage

3.3.1.1. Cinétique de migration du sel

Les figures 16, 17, 18, 19 et 20 représentent l'allure générale de la migration du sel dans les différentes parties du fromage salé pendant 60 mn dans une saumure agitée et découpé selon la figure 3.

Pour la clarté du texte, nous avons dû placer sur une même figure, les évolutions des taux de sel de 2 tranches adjacentes selon la verticale du fromage ainsi que l'évolution de leur moyenne pondérée. De cette manière, il nous a été possible de montrer l'existence des deux types d'équilibre qui s'effectuent lors de l'affinage du Camembert

Fig.16 Migration du sel après saumurage : équilibre [cc_sc]

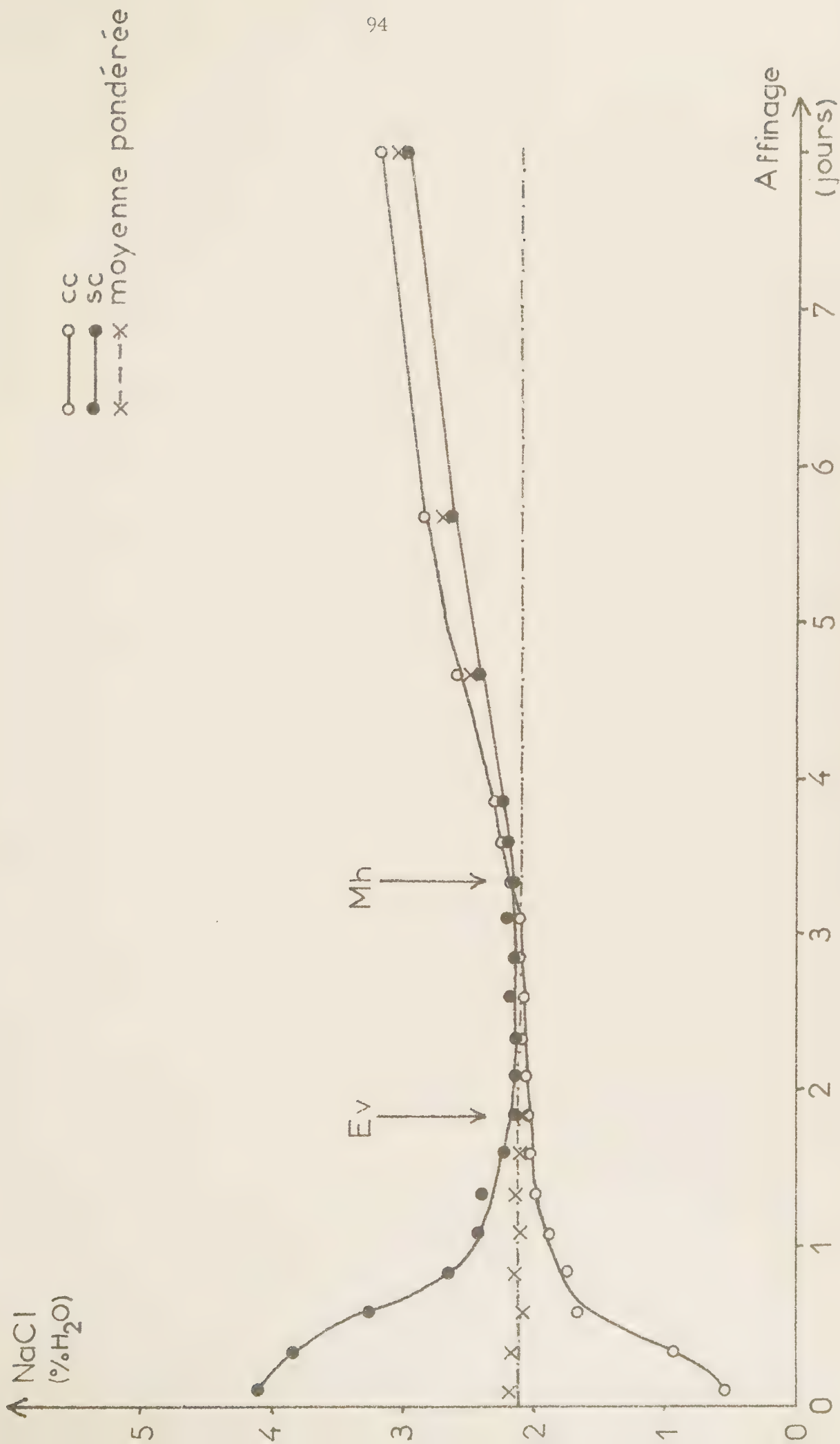


Fig.17 _Migration du sel après saumurage: équilibre

c1_s1

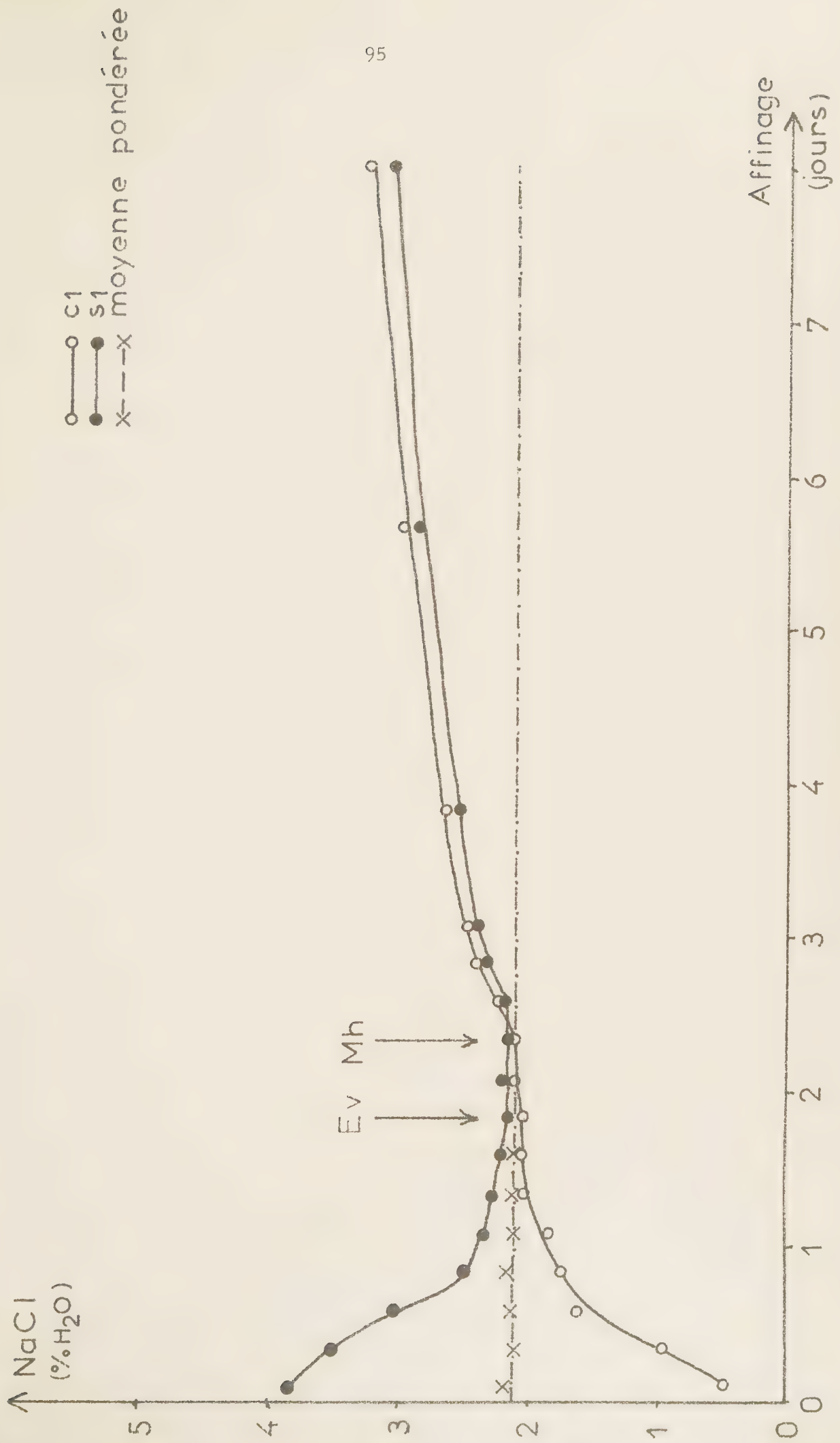


Fig.18 - Migration du sel après saumurage : équilibre [c2_s2]

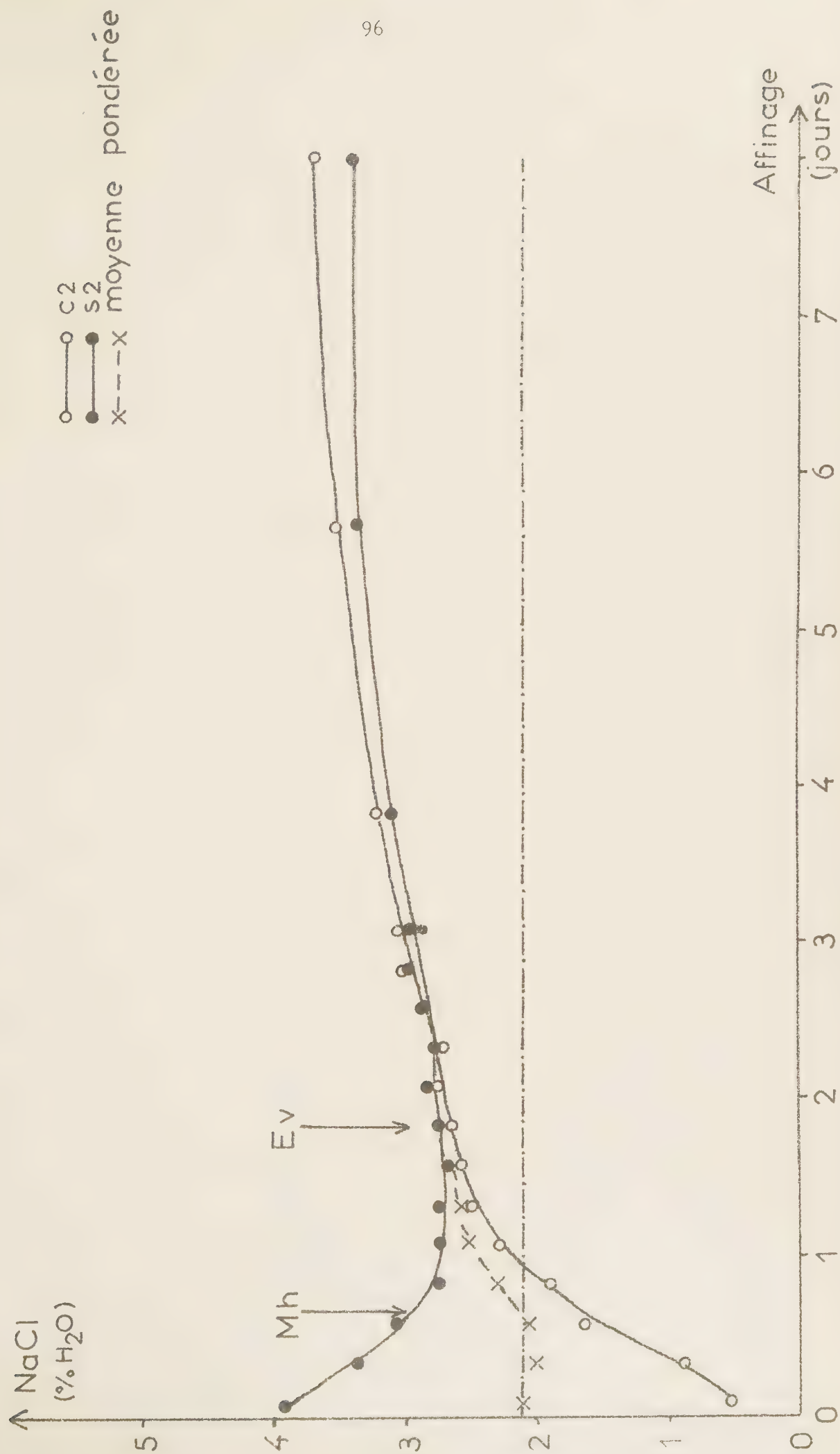


Fig.19 - Migration du sel après saumurage : équilibre [c3_s3]

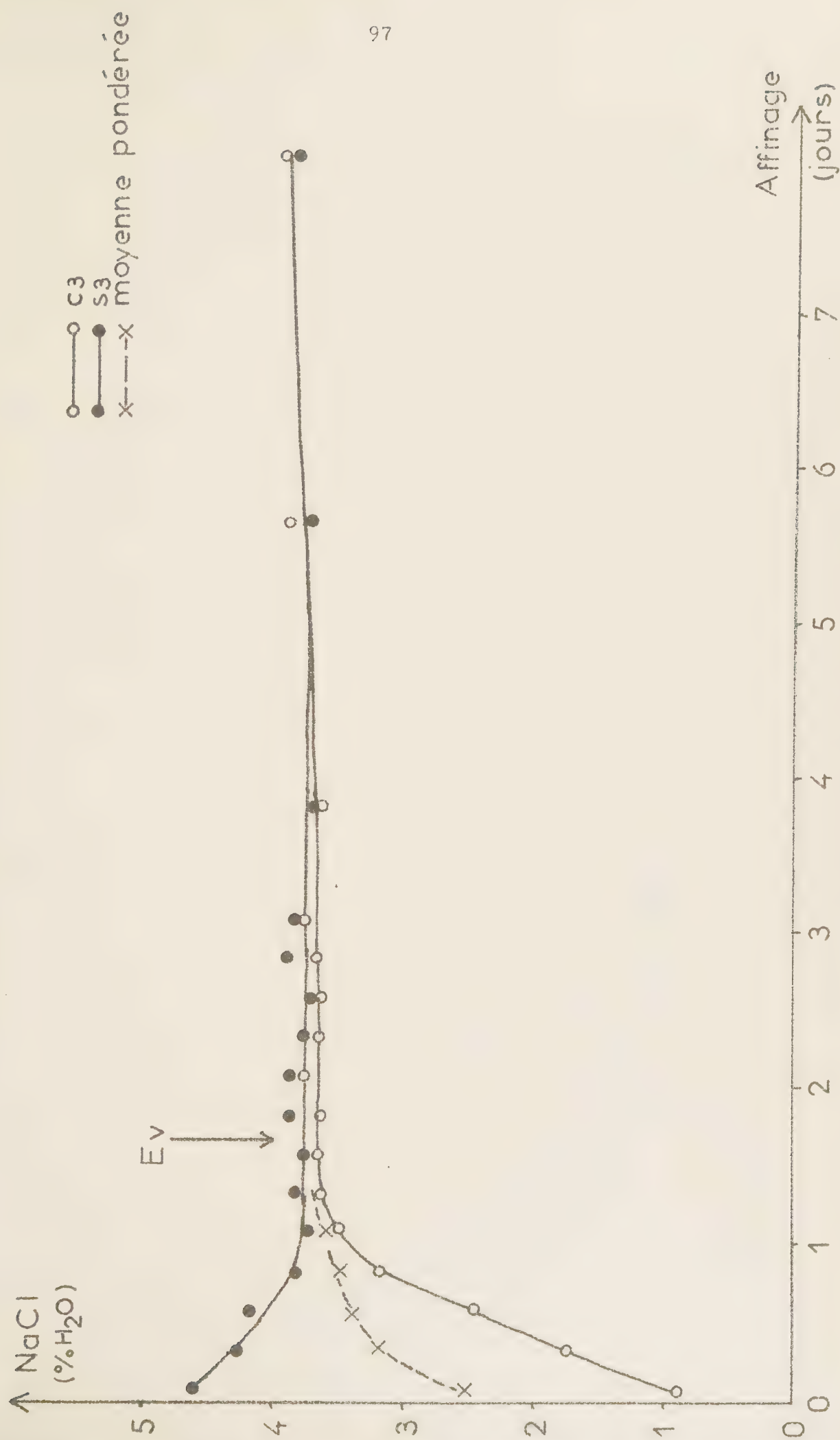
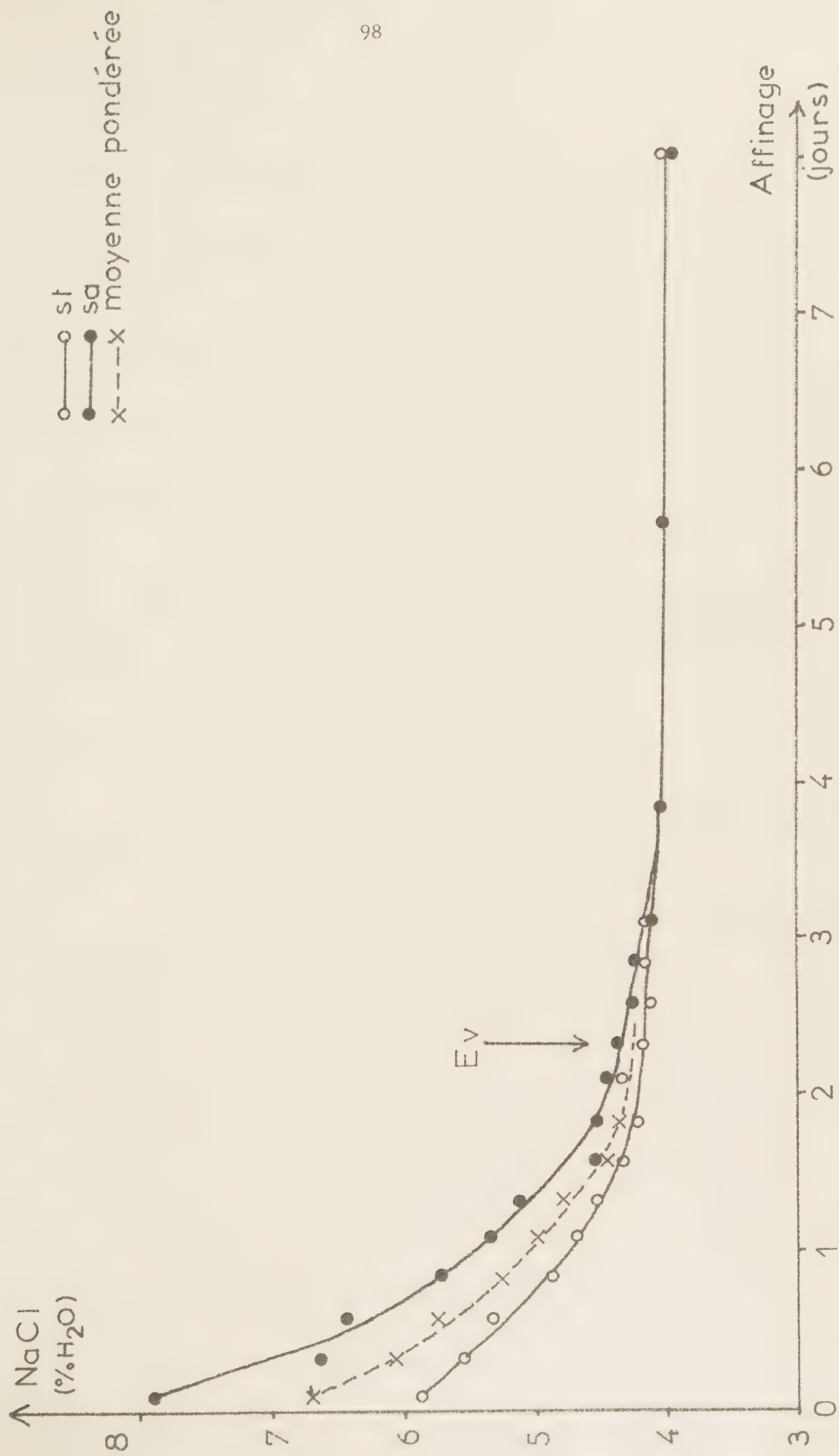


Fig.20_Migration du sel après saumurage : équilibre [st - sa]



- Equilibre vertical (indiqué sur les figures par Ev) lorsque :

$$[CC] = [SC] , [C1] = [S1] , [C2] = [S2] , [C3] = [S3] \text{ et } [ST] = [SA]^{(1)}$$

- Equilibre horizontal lorsque :

$$[CC] = [C1] = [C2] = [C3] = [ST] \text{ et}$$

$$[SC] = [S1] = [S2] = [S3] = [SA]$$

Nous avons aussi indiqué sur les courbes les moments de pénétration du sel en provenance de la surface cylindrique (Mh = migration horizontale).

3.3.1.1.1. Equilibre vertical

L'équilibre vertical est obtenu dans un temps relativement court : environ 48 heures .

Les taux de sel obtenus, lorsque cet équilibre est atteint et lorsqu'il n'y a pas eu de pénétration à partir de la surface cylindrique, sont d'environ 2,2 (% H₂O). Cette valeur reste constante tant qu'il n'y a pas migration du sel en provenance de la surface cylindrique. Lorsque celle-ci s'effectue, on assiste à une lente élévation des taux de sel qui tendent vers une valeur voisine de 3,6 (% H₂O) qui est la valeur moyenne du fromage.

(1) [] représente la concentration en NaCl (% H₂O) pour la portion considérée.

3.3.1.1.2. Equilibre horizontal

Nous avons représenté sur la figure 21 l'évolution du temps de pénétration du front de sel (Mh) dans le sens horizontal en fonction de la distance parcourue. L'extrapolation de cette courbe jusqu'à la valeur 5,5 cm nous permet de déterminer approximativement le temps au bout duquel le sel provenant du talon atteint le centre géométrique du fromage : environ 150 heures.

A ce moment, l'équilibre n'est pas encore atteint et les valeurs obtenues à 15 jours d'affinage (figure 22) montrent, qu'à ce stade de l'affinage, il existe encore un gradient de concentration.

Par ailleurs, l'allure des courbes (figures 16, 17, 18, 19 20) montre qu'après pénétration du sel provenant du talon les taux de sel dans les couches internes sont toujours supérieurs aux taux de sel des couches proches de la surface plane. Il semble donc que la diffusion horizontale se fasse moins bien dans les couches proches de la surface plane que dans les couches profondes.

A cela, deux explications sont possibles :

- Le degré d'humidité des couches de surface est plus faible, tout au moins en début d'affinage, ralentissant la diffusion horizontale.
- Le développement de *Penicillium caseicolum* à partir du 4ème jour d'affinage fausse la mesure des concentrations de chlorure de sodium.

Néanmoins, ces résultats, en accord avec ceux de KIEFERLE et SEYRER-REINDL (67), qui trouvent des taux de sel variant entre 2,59 % et 2,87 % dans du Camembert 9 jours après salage, montrent que le processus de diffusion après salage est lent.

Fig.21 Durée nécessaire de pénétration
du sel à la distance x, mesurée à
partir de la surface cylindrique.

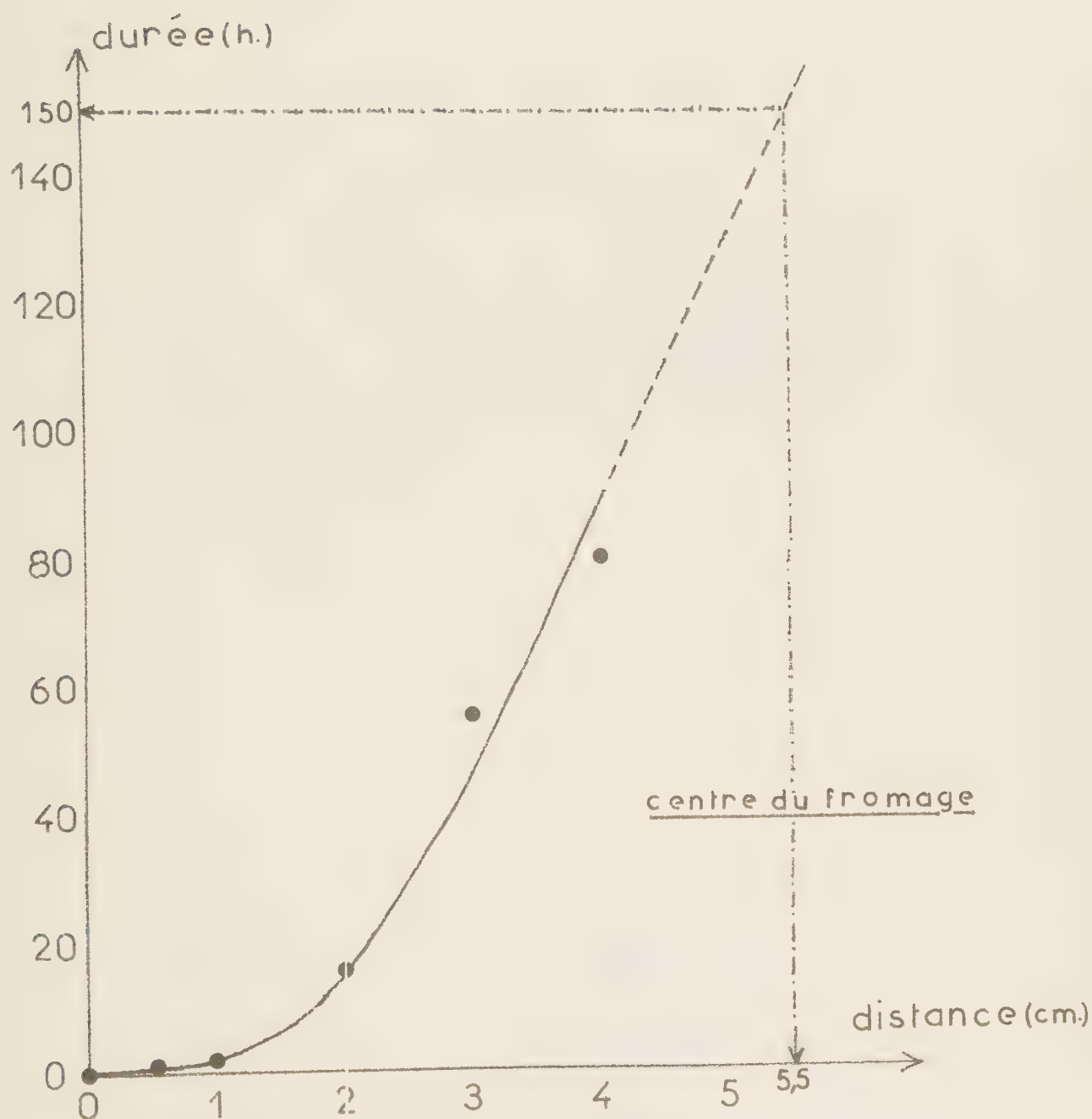
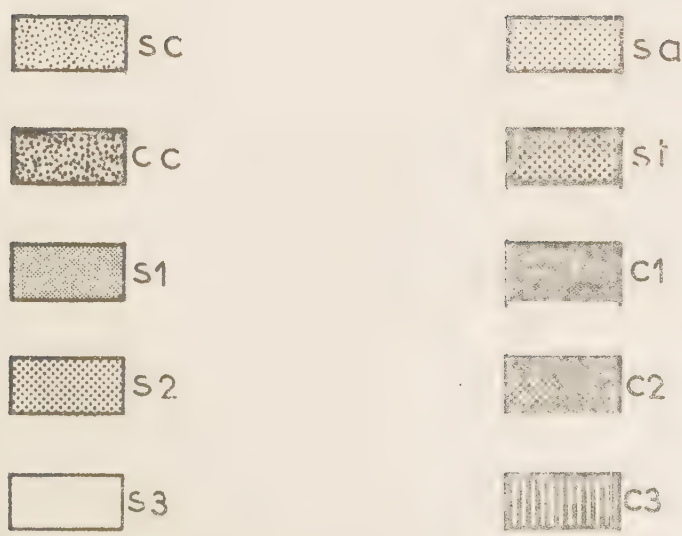
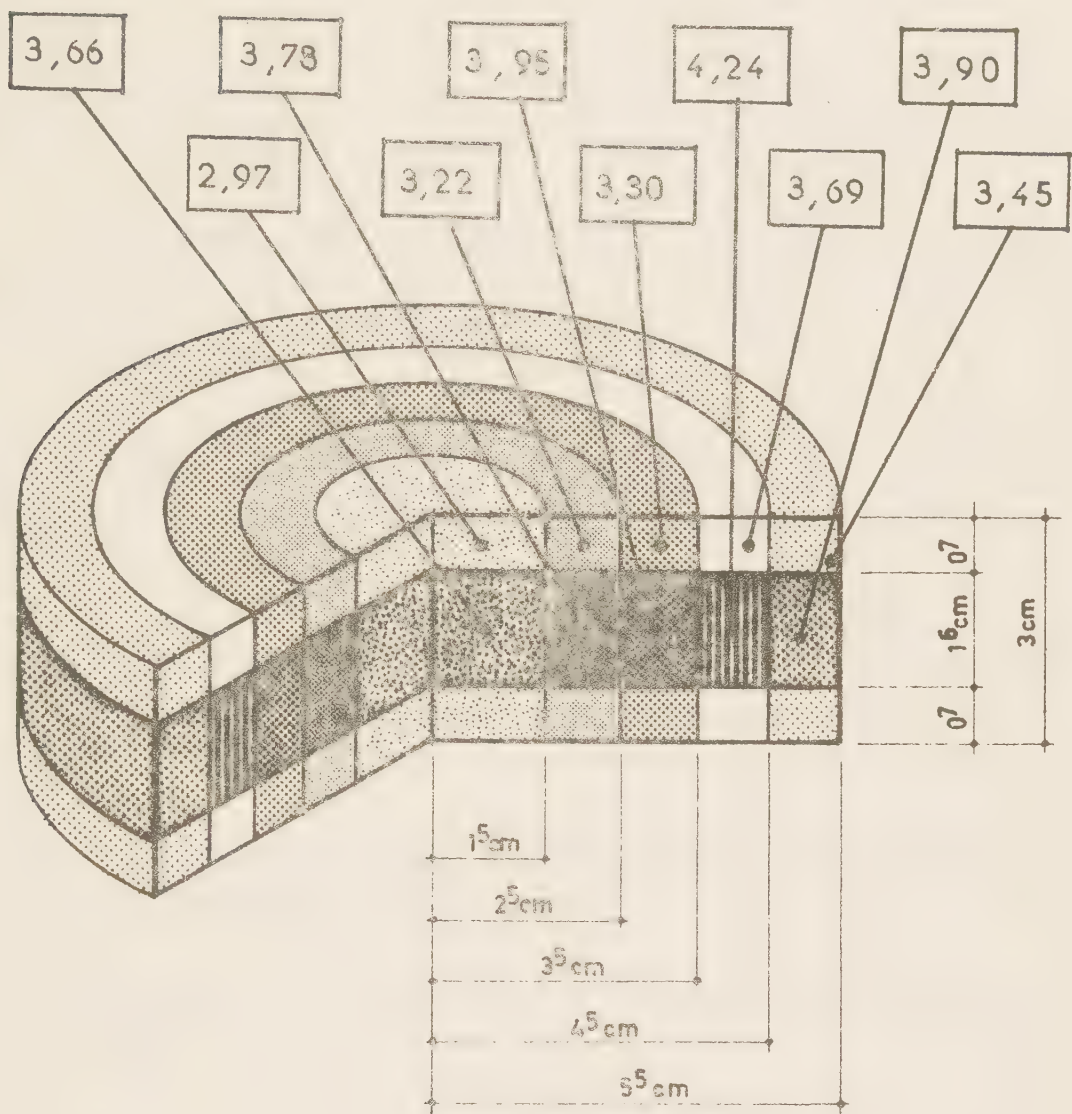


Fig 22. Répartition du sel après 15 jours d'affinage (%H₂O).



3.3.1.1.3. Importance de l'absorption de sel par les différentes surfaces sur les allures de diffusion

Les taux de NaCl (% H_2O) moyens pour l'ensemble du fromage se situent, après un saumurage de 60 mn dans une saumure agitée, à 3,6 (% H_2O) et varient peu pendant l'affinage.

L'absorption de sel par les surfaces planes correspond à la valeur d'équilibre dans les couches centrales : 2,2 %. On en déduit facilement la quantité de sel prise par le talon (1,4 %).

Rapportant ces valeurs à la superficie des différentes surfaces de pénétration et à la quantité d'eau totale contenue dans le fromage non salé (58,81 % x 279,9 g) nous constatons que :

- 1 cm^2 de surface plane du fromage frais permet l'incorporation définitive de 19 mg de sel en 60 mn.
- 1 cm^2 de surface cylindrique permet l'incorporation définitive de 22 mg de sel en 60 mn.

Le rapport de ces deux valeurs se trouve être identique au rapport des coefficients de diffusion précédemment déterminés (respectivement 0,20 et 0,25 cm^2/j) apportant une démonstration supplémentaire de l'influence de la structure du fromage sur l'absorption de sel.

Il paraît alors évident qu'en se fixant le taux de sel moyen du fromage, les allures de pénétration du sel et, en particulier, le niveau de stabilisation des parties centrales du fromage seront fonction de la structure du fromage. Ceci peut avoir des conséquences importantes sur le développement des moisissures de surface.

Fig.23 _Migration de l'eau après saumurage.

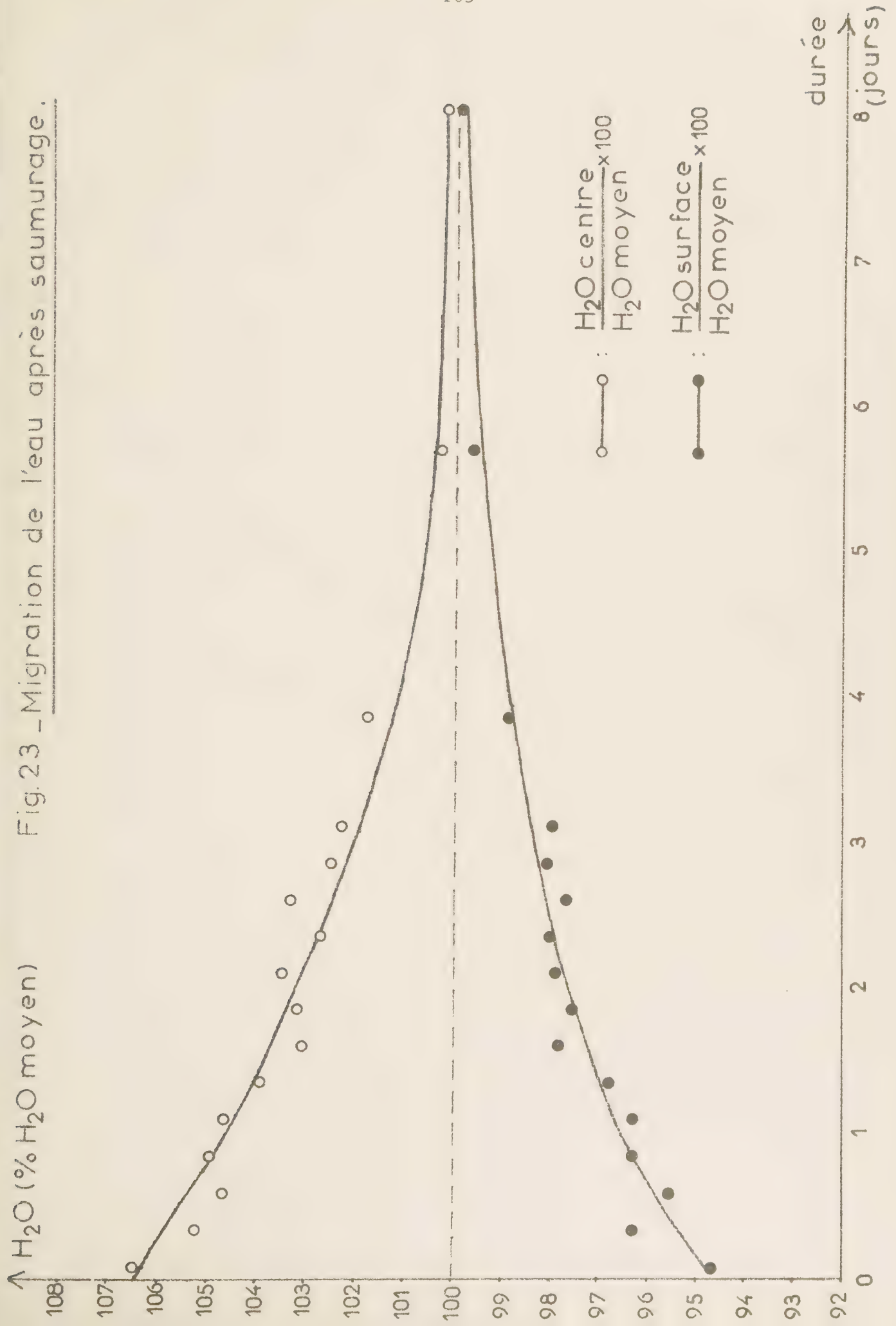
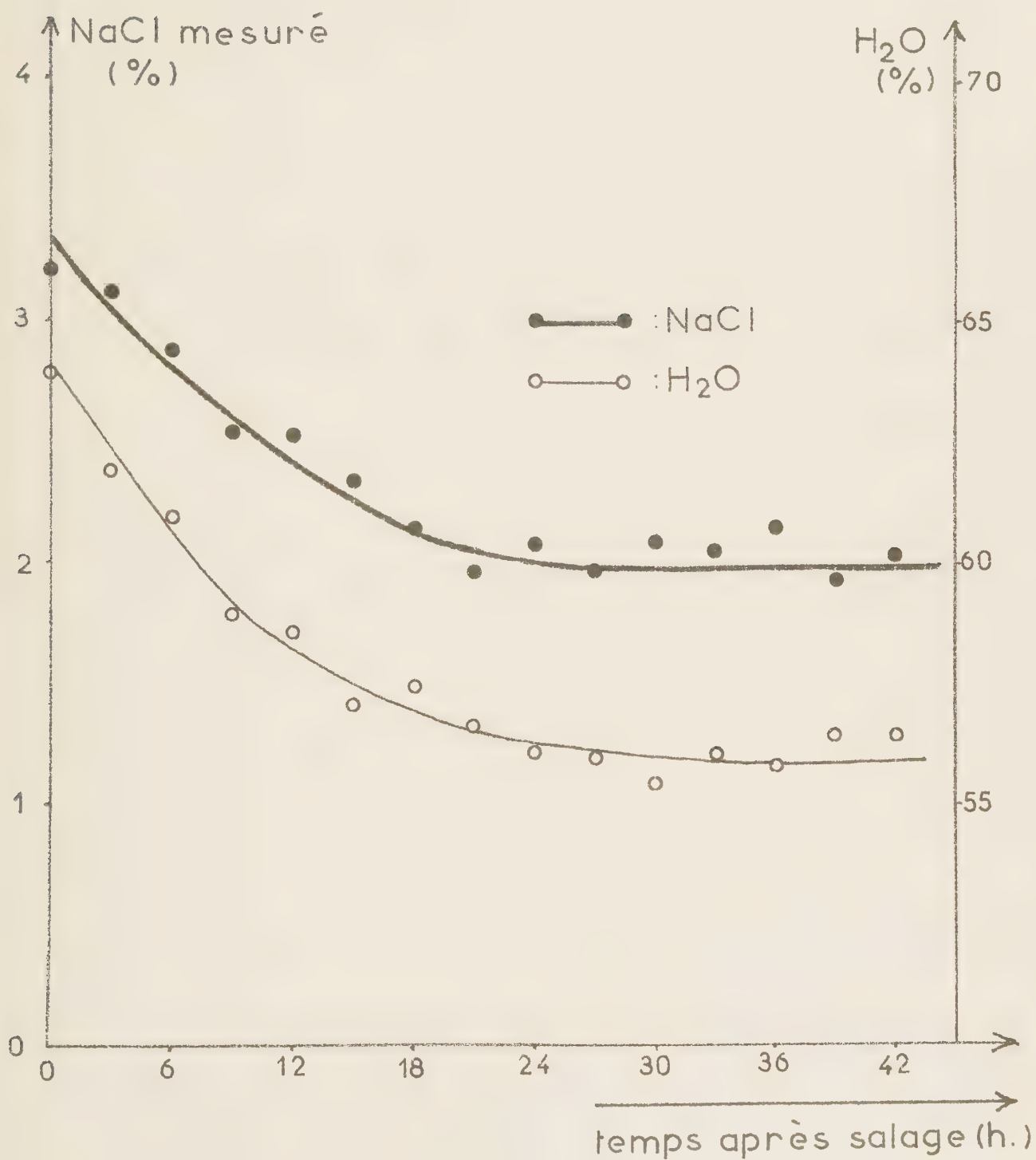


Fig. 24 Salage à sec : perte de sel et
d'eau par égouttage.



Il apparaît donc que tout le sel initialement posé sur le fromage n'est pas un sel "utile". Afin d'ajuster les taux de NaCl moyens dans le fromage après salage, nous avons donc étudié la quantité de sel à appliquer sur le fromage.

3.3.2.1. Absorption de NaCl par application de sel sec

Divers poids de sel ont été divisés en 3 fractions proportionnelles aux surfaces à saler et ont été appliqués sur le fromage. La mesure des taux de NaCl absorbé a été effectuée 48 heures après ce salage, c'est-à-dire lorsque l'égouttage du fromage est terminé.

La figure 25 montre la variation des taux de sel absorbés par le fromage en fonction du taux de sel incorporé.

L'écart enregistré par rapport à la médiane donne la perte de sel par égouttage. Nous trouvons ainsi que, pour obtenir un taux de sel moyen de 2 % dans le fromage, il est nécessaire d'introduire par collage 3 % de sel.

C'est cette valeur qui a ensuite été utilisée pour l'étude de la diffusion du sel après salage à sec.

3.3.2.2. Cinétique de migration du sel. Comparaison avec le salage en saumure (figure 26)

Nous avons représenté sur une même figure, les allures de pénétration du sel dans l'eau des portions CC et SC après le salage par saumurage et après le salage à sec. Il convient de noter la moins bonne régularité des allures de diffusion après salage à sec en raison des difficultés rencontrées pour obtenir une répartition parfaite du sel

Fig. 25 Absorption de sel par application
de sel fin

10

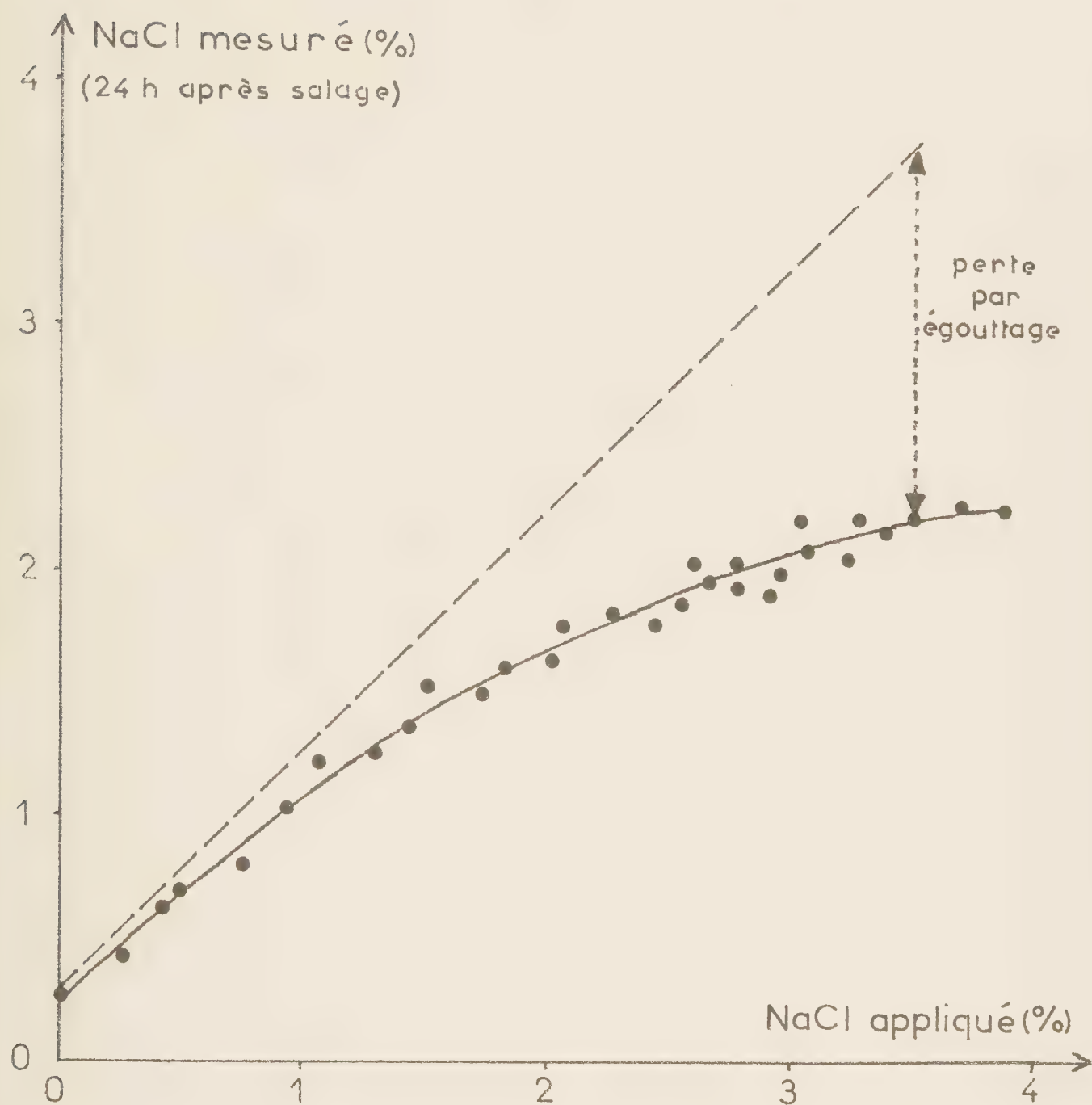
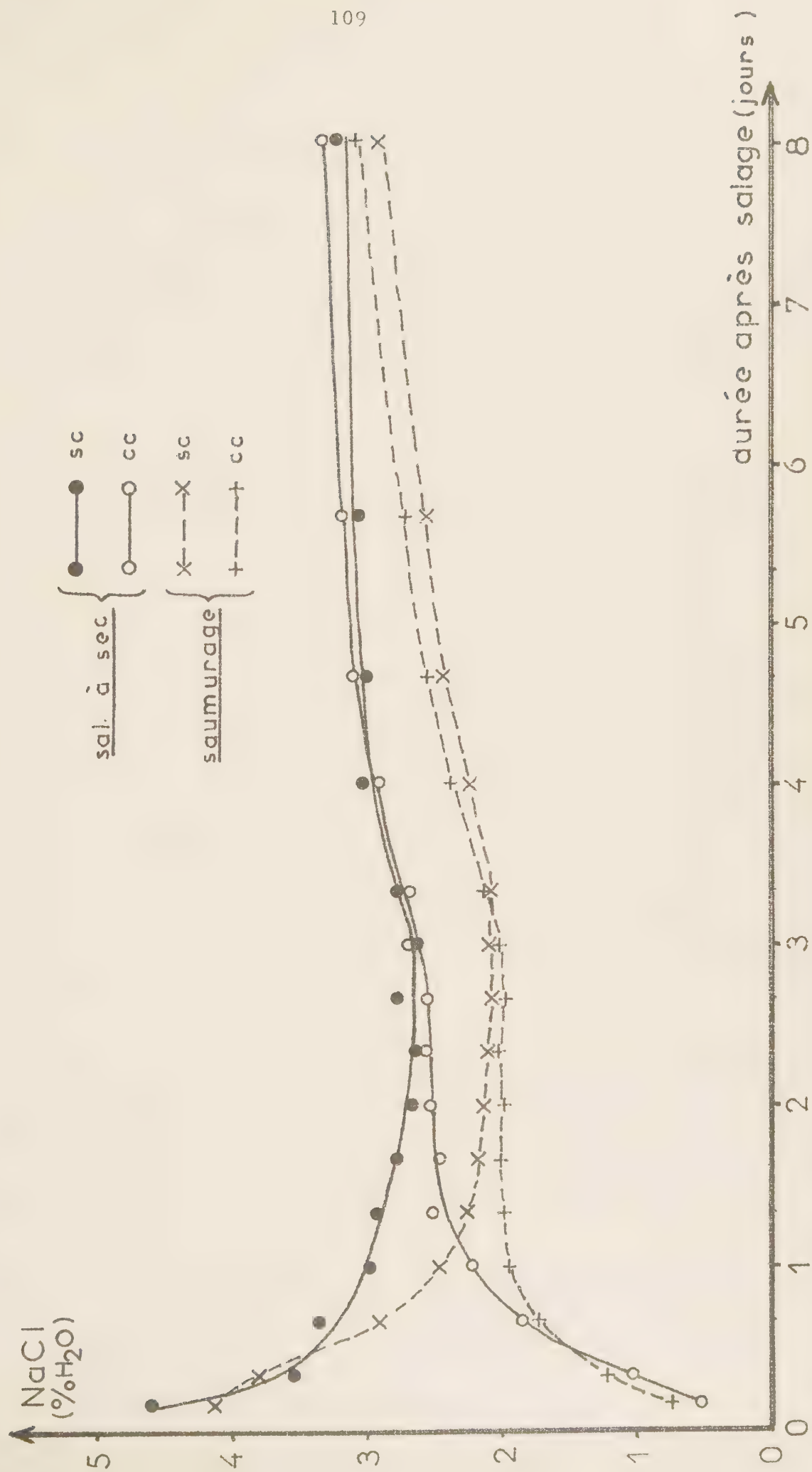


Fig. 26 - Saumurage et salage à sec : équilibre cc-sc



sec sur la surface du fromage.

Toutefois, nous pouvons noter que le niveau d'équilibre lors du salage à sec qui s'effectue vers 48 heures, comme dans le cas du salage en saumure, se situe à 2,7 (% H_2O) pour un taux moyen dans le fromage de 3,6 (% H_2O) identique au salage en saumure. Ces valeurs ont également été obtenues pour les autres portions du fromage (C1/S1 et C2/S2).

En ramenant ces valeurs au cm^2 de surface du fromage non salé (humidité 59,60 %, poids 278,7 g) nous obtenons les résultats suivants :

a) Salage en saumure

- 1 cm^2 de surface plane a absorbé 19,2 mg de sel
- 1 cm^2 de surface cylindrique a absorbé 22,7 mg de sel

b) Salage à sec

- 1 cm^2 de surface plane a absorbé 23,6 mg de sel
- 1 cm^2 de surface cylindrique a absorbé 15 mg de sel

Notons que la quantité de sel sec réellement déposée sur le fromage était de 28,8 mg pour toutes les surfaces. Il apparaît donc une différence fondamentale entre le salage en saumure et le salage à sec : dans le salage en saumure, une quantité de sel plus importante est absorbée par la surface cylindrique. Dans le salage à sec, le phénomène est inverse.

Dans ce dernier cas, si l'on applique des quantités de

sel rigoureusement identiques sur toutes les surfaces, la perte de sel par égouttage est plus grande à partir de la surface cylindrique qu'à partir de la surface plane.

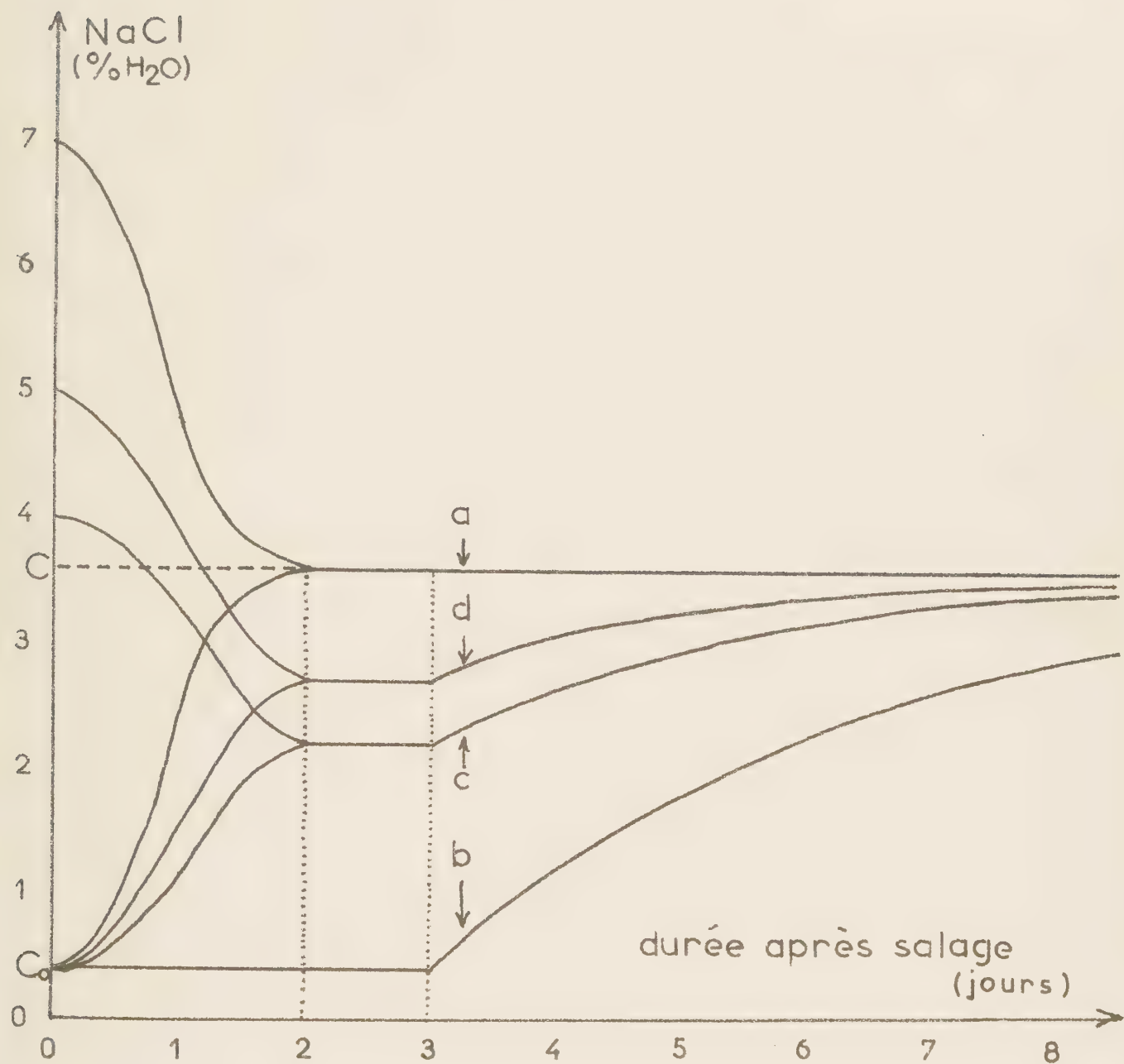
Lorsqu'on recherche, par salage à sec, un taux de sel moyen identique, ce phénomène entraîne donc une pénétration plus importante par les surfaces planes.

Nous avons généralisé (figure 27) ces résultats aux cas extrêmes de salage du Camembert que seraient un salage par les surfaces planes uniquement ou par le talon seulement, en nous fixant toujours un taux de sel moyen de 3,6 (% H_2O) soit environ 2 % dans le fromage. Cette figure montre la position des méthodes pratiques de salage entre ces deux extrêmes.

On peut ainsi noter que le système de salage qui permettrait d'obtenir la meilleure homogénéité dans la pâte serait un salage effectué par les surfaces planes uniquement. Un léger salage de la surface cylindrique reste toutefois obligatoire pour assurer une protection convenable de cette partie du fromage vis à vis d'éventuelles contaminations, par des microorganismes indésirables.

Cependant ces allures de diffusion sont propres au Camembert ; pour un fromage plus épais (Chaource) ou de plus grand diamètre (Brie), la position des allures réelles de diffusion entre les deux extrêmes serait évidemment différente.

Fig. 27 - Généralisation des allures de migration
du sel (couches cc et sc).



- a : salage par surface plane.
 b : " " " cylindrique.
 c : " en saumure.
 d : " à sec.

C : taux de sel moyen.

C₀ : " " " initial.

IV - CONCLUSIONS

Au cours de notre étude, nous avons pu faire ressortir un certain nombre d'éléments de comparaison entre le salage à sec et le salage en saumure.

Le salage en saumure des pâtes molles présente les caractéristiques suivantes :

- a) La composition de la saumure n'est pas constante pendant son utilisation en raison de l'augmentation de la charge en impuretés et cette variation peut entraîner des différences notables dans le salage et l'affinage des fromages si un contrôle précis n'est pas effectué.
- b) L'absorption de sel peut varier d'un fromage à l'autre si la solution salée n'est pas agitée et saturée en sel pendant toute la durée du saumurage.
- c) Il existe un rapport constant entre l'absorption de sel par la surface plane et la surface cylindrique, mais ce rapport

peut évoluer selon la technique de fabrication du fromage, la répartition de l'eau et probablement selon le temps de repos entre le démoulage et le salage.

- d) Le coefficient de diffusion moyen du sel dans l'eau des fromages à pâte molle de type Camembert est voisin de $0,22 \text{ cm}^2/\text{j}$. Il est légèrement plus élevé pour la pénétration par la surface cylindrique. Sa valeur augmente notablement lorsque la durée de saumurage est longue et tend vers une valeur comprise entre $0,44$ et $0,60 \text{ cm}^2/\text{j}$. Ces deux derniers chiffres constituent des caractéristiques de la pâte mais ne sont pas utilisables pour le calcul de l'absorption de sel pour les durées habituelles de salage. Par contre, la valeur $0,22 \text{ cm}^2/\text{j}$ appliquée à nos fromages expérimentaux permet de déterminer avec une bonne précision les taux de sel obtenus dans les fromages.

L'étude mathématique du processus de diffusion nous a permis de définir une équation permettant de calculer la durée du salage nécessaire pour obtenir un taux de sel déterminé. L'utilisation de cette formule pour le salage d'un type de fromage donné nécessite la détermination préalable du coefficient de diffusion global du sel dans l'eau de ce fromage.

L'analyse de cette équation nous montre que le taux de sel obtenu au bout d'un temps déterminé est fonction de la concentration de la saumure, de la surface spécifique du fromage et du coefficient de diffusion du sel. Ce dernier est lui-même influencé par divers paramètres : température, taux de matières grasses et de matières sèches du fromage.

De ce fait, la pénétration du sel lors du salage par saumurage peut être soumise à de nombreuses causes de variation propres à la saumure ou au fromage.

- e) Après salage par saumurage, la répartition de l'eau et du sel n'est pas uniforme et après 15 jours d'affinage il existe encore un gradient de concentration en sel dans l'eau du fromage.

Le salage à sec, quant à lui, présente les caractéristiques suivantes :

- a) La composition du milieu salant est constante d'une fabrication à l'autre.
- b) L'absorption de sel peut être variable d'un fromage à l'autre si on n'utilise pas des méthodes mécanisées. Même dans ce cas, des écarts peuvent subsister. En effet, les matériels connus actuellement sont constitués soit de trémies soit de systèmes de fluidisation et la granulométrie du sel joue un rôle important dans les deux cas.
- c) Théoriquement, il est possible de faire varier les proportions de sel entre la surface cylindrique et la surface plane. Il est alors envisageable d'incorporer la plus grande partie du sel par la surface plane et de ne saler qu'au minimum la surface cylindrique. Nous aboutirions alors à une meilleure homogénéité dans la répartition du sel et à une meilleure protection de la surface vis à vis des contaminations microbiologiques.

Nous pouvons alors émettre un certain nombre d'hypothèses pour expliquer la meilleure qualité organoleptique des fromages salés à sec :

- Si un salage différentiel de la surface plane et de la surface

cylindrique est effectué, la protection de la surface vis à vis des moisissures indésirables sera plus efficace.

- La répartition du sel dans tout le fromage sera plus rapidement homogène pouvant entraîner un mécanisme d'affinage différent.

En effet, PHELAN et Coll. (109) ont montré qu'une augmentation de la concentration en sel augmente la résistance de la β -caséine envers la protéolyse. Or, sa dégradation entraîne la formation de peptides amers (54, 113). En conséquence, si le sel se répartit de façon homogène rapidement, nous pouvons supposer que la dégradation de la β -caséine sera plus faible dans les parties centrales du fromage.

De même, WILLART et SJOSTROM (149) ont déterminé sur du fromage Svecia que la lipolyse est ralentie lorsque le taux de sel s'élève. THAKUR et Coll. (134) ont abouti aux mêmes conclusions pour le Cheddar. SWIATEK et POZNANSKI (133) ont pour leur part montré qu'une élévation du taux de sel dans du fromage Trappist réduit la formation d'hydrogène sulfuré.

Il semble donc bien qu'un taux de sel plus important dans toute la masse du fromage dès le début de l'affinage puisse entraîner une modification de la maturation.

Pour conclure, nous dirons que le salage à sec peut conduire à une meilleure qualité organoleptique du produit à condition que les taux de sel puissent être fixés précisément d'un fromage à l'autre. Or ce salage à sec effectué manuellement ou avec une passoire ne peut permettre une parfaite régularité, même s'il est effectué par un personnel expérimenté. Les machines à saler, si elles ont apporté une nette amélioration dans ce domaine, ne peuvent atteindre le niveau de précision qui est obtenu avec une saumure utilisée dans de bonnes conditions.

Nous avons pu déterminer dans le cas du salage en saumure l'influence de la plupart des paramètres du salage. Mais dans le cas du

salage à sec, de nombreux paramètres restent incontrôlés sinon incontrôlables. Il nous suffira de citer la méconnaissance de l'influence de la texture et de l'humidité superficielle du fromage sur la quantité de sel réellement absorbée lors du salage à sec, pour montrer la difficulté d'une bonne prévision du degré de salage avec ce procédé.

Si l'on a pu affirmer que le salage à sec permet parfois d'obtenir une meilleure qualité organoleptique, il n'en reste pas moins qu'il ne peut être que difficilement inclus dans les procédés mécanisés de fabrication pour lesquels la régularité dans la composition des produits est un des objectifs.

V - BIBLIOGRAPHIE

- 1 - AGAGABYAN (A.), SAAKYAN (R.), AMIRKHNYAN (R.), 1970
Influence des oligo-éléments sur la maturation des fromages en saumure.
18ème Congr. Int. Lait. 1F, 398

- 2 - ANDERSSON (O.A.), DANIELSSON (M.), JOOST (K.), 1951
Experiments on the salting of half-fat and full-fat Swedish Manor Cheese.
Anal. : Dairy Sci. Abstr., 13, 4, 421

- 3 - ANTIPOVA (G.), 1967
Der Einfluss des Salzungsprocesses auf die Qualität des Käses.
Milchwissenschaft, 22, 3, 185

- 4 - BEDNARSKI (W.), CHOJNOWSKI (W.), JAKUBOWSKI (J.), POZNANSKI (S.), 1971
Sterilization of brines for salting cheese.
Anal. : Dairy Sci. Abstr., 33, 8, 587, Abstr. 3873

- 5 - BERG Van den (G.), VRIES de (E.), 1974
Der Zusammenhang zwischen den Faktoren, die den pH von Käse beeinflussen.
Milchwissenschaft, 29, 4, 214-218

- 6 - BERGLOF (A.), 1961
Sorbinsyrans fungicida effekt på jäst och mögel vid ostens saltning och lagring. (Effet fongicide de l'acide sorbique lors du salage et de l'affinage).
Svenska Mej. Risks. UPA, 65, 1-18

- 7 - BRATHEN (G.), 1974
En enkel metode for halvkantitativ bestemmelse av nitrit og nitrat i saltlake. (Méthode semi-quantitative de dosage des nitrites et nitrates dans les saumures).
Meieriposten, 61, 14/15, 1-4

- 8 - BREENE (W.M.), OLSON (N.F.), PRICE (W.V.), 1965
Salt absorption by Cheddar cheese curd.
J. Dairy Sci., 48, 5, 621-624

- 9 - BRENET (M.), CENTELEGHE (J.L.), MILLIERE (J.B.), RAMET (J.P.), WEBER (F.), 1972
Etude d'un accident en fromagerie de type Camembert causé par des Mucorales.
Lait, 52, 513/514, 141-148

- 10 - BRYANT (L.B.), 1944
Le sel en fromagerie.
Anal. : Lait, 24, 237/238, 275-276

- 11 - BYERS (E.L.), PRICE (W.V.), 1938
Observations sur le salage du "Brick Cheese".
Anal. : Lait, 18, 180, 1077

- 12 - CASALIS (J.), LUQUET (F.M.), ROSSIER (F.), 1969
Sur le traitement des saumures de fromagerie par les rayons ultra-violets.
Lait, 49, 483/484, 134-145

- 13 - CENTELEGHE (J.L.), MILLIERE (J.B.), VEILLET (L.), WEBER (F.), 1971
Aspects physico-chimiques et microbiologiques du salage en saumure des pâtes molles moisies.
Technique laitière. 10 juillet 1971, 708; 13-19

- 14 - CENTELEGHE (J.L.), MILLIERE (J.B.)
Aspects technologiques du salage en saumure des pâtes molles moisies.
Technicien du Lait, septembre 1972, 7-12

- 15 - CENTELEGHE (J.L.), 1973
Evolution de la flore microbienne des saumures alimentaires.
Cas des fromages pasteurisés à pâte molle moisie.
Thèse de Doctorat de Spécialité, Université Nancy I,
20 septembre 1973

- 16 - CHARRUY (P.), 1959
Les industries du sel.
Bull. Soc. Sci., Nancy, juin 1959, 138-154

- 17 - CHOMAKOV (C.), 1967
Isolation of lactic bacteria causing ropiness of white cheese brine.
Milchwissenschaft, 22, 9, 569-573

- 18 - CLAYTON (W.), 1923
Le sel pour l'industrie laitière.
Anal. : Lait, 3, 3, 230

- 19 - CLAYTON (W.), 1927
L'emploi et les effets du sel dans le beurre et la margarine.
Lait, 7, 70, 913-927

- 20 - CRANK (J.), 1970
The mathematics of diffusion.
Oxford University Press, Ely House, London W1

- 21 - DANIELSSON (H.), 1947
Saltningsförsök med herrgardsost. (Expériences de salage avec le fromage suédois "Manor").
Svenska Mejeritidn., 39, 2, 15 et 39, 3, 32-34

- 22 - DAWSON (D.J.), 1961
The effect of Cheddar cheese of higher salt content.
Austral. J. Dairy Technol., 16, 1, 33-34

- 23 - DOLEZALEK (J.), 1956
Etude biochimique de *Penicillium caseicolum*.
Ind. Alim. Agric., 73, 7/8, 535-539

- 24 - DOLEZALEK (J.), RADL (J.), 1959
Vliv solné lázně na prostup soli a jakost moravských bočnicků.
(Saumurage et diffusion du sel dans le fromage de Moravie).
Průmysl Potravin, 10, 4, 177-182

- 25 - DOLEZALEK (J.), BREZINA (P.), 1970
Le salage du caillé dans la production continue des fromages.
18ème Congr. Int. de Lait., 1F, 341

- 26 - DURAND (P.), LAJON (A.), ROZIER (J.), 1971
Détection de l'addition de caséine dans les saumures de jambon.
Recl. Méd. Vét. Ec. Alfort, 147, 8, 853-858

- 27 - EICHLER (F.), 1968
Beurteilung der Auskeimfähigkeit von Blauschimmelsporen.
Milchwissenschaft, 23, 10, 632-635

- 28 - FIL-IDF, 1958
Détermination de la matière sèche du fromage et du
fromage fondu.
Norme 4
- 29 - FIL-IDF, 1972
Fromage : détermination de la teneur en chlorures
(Méthode de référence).
Norme 17 A
- 30 - FOX (P.F.), WALLAY (B.F.), 1971
Influence of sodium chloride on the proteolysis of casein
by rennet and by pepsin.
J. Dairy Res., 38, 2, 165-170
- 31 - FOX (P.F.), 1974
Salt distribution in Cheddar cheese.
Irish J. Agric. Res., 13, 2, 129-135
- 32 - FUTSCHIK (J.), 1961
The sterilization of brine baths.
Anal. : Dairy Sc. Abstr., 23, 10, 490, Abstr. 2952
- 33 - FUTSCHIK (J.), 1953
Vergleichende untersuchungen über die Diffusion von
Kochsalz bei Nass und Trockengesalznen Tilsiterkäsen.
13ème Congr. Int. de Lait., 2, 642-647
- 34 - GALESLOOT (T.E.), 1961
Over de werking van nitraat bij de bestrijding van boter
zuurgisting in kaas. (A propos de l'action des nitrates
pour prévenir la fermentation butyrique dans les fromages).
Neth. Milk. Dairy J., 15, 62, 395-410
- 35 - GEORGAKIS (S.A.), 1973
Untersuchungen über die Herstellung von griechischem
Salzlaken-Käse "Fetta".
Milchwissenschaft, 28, 8, 500-502
- 36 - GEURTS (T.J.), WALSTRA (P.), MULDER (H.), 1972
Brine composition and the prevention of the defect
"soft rind" in cheese.
Neth. Milk Dairy J., 26, 2/4, 168-179

- 37 - GEURTS (T.J.), 1972
Diffusie van zout en water bij hetzouten van kaas.
(Diffusion du sel et de l'eau pendant le salage du fromage).
Versl. landbouwk. Onderz, Wageningen, 777, 127 p
- 38 - GEURTS (T.J.), WALSTRA (P.), MULDER (H.), 1974
Transport of salt and water during salting of cheese.
I. Analysis of the process involved.
Neth. Milk Dairy J., 28, 2, 102-129
- 39 - GORANOV (V.), 1970
Echange des ions dans la fabrication du fromage "Kachkawal".
18ème Congr. Int. de Lait., 1F, 364
- 40 - GORINI (C.), 1904
La saumure dans les laiteries au point de vue bactériologique.
Revue gén. Lait, 4, 73-76
- 41 - GORMICAN (A.), 1972
Sodium in foods and beverages.
J. Milk Food Technol., 35, 1, 1-4
- 42 - GROSSERON (T.), 1907
Recherches bactériologiques sur le sel marin.
Ind. Lait., 32, 409-411
- 43 - GUPTA (S.K.), WHITNEY (R.M.), TUCKEY (S.L.), 1974
Brine soluble proteins of Cheddar and Gouda Cheese.
J. Dairy Sci., 57, 5, 540-544
- 44 - HARDY (J.), 1970
Etude de l'évolution chimique des saumures de fromagerie.
D.E.A. Science du Lait, Nancy, 45 p. dactyl.
- 45 - HAVE (A.J.), MULDER (H.), 1957
Flame-photometric estimation of the sodium, potassium and
calcium content of milk and cheese.
Neth. Milk Dairy J., 11, 2, 128-143

- 46 - HINTERBERGER (S.), 1965

Brine and its sterilization

Anal. : Dairy Sci. Abstr., 27, 2, 63, Abstr. 403

- 47 - HOECKER (W.H.), HAMMER (B.W.), 1949

Migration du sel dans le caillé de Cheddar et effets sur l'humidité, le pH et le contenu bactérien.

Anal. : Lait, 29, 281/282, 56

- 48 - HOSTETTLER (H.), VING (M.), SAHLI (K.), 1943

Phénomènes de gonflement provoqués dans la saumure du fromage d'Emmental par les bactéries Coli-aérogènes et Casei-delta.

Anal. : Lait, 23, 221/223, 78

- 49 - HOSTETTLER (H.), KURSTEINER (J.), SAHLI (K.), 1945

Der Einfluss des Salzens des Käsebruches im Käsekessel auf den Wasser und Kochsalzgehalt sowie auf den Eiweissabbau des reifenden Käses.

Annu. Agric. Suisse, 46, 10, 929-948

- 50 - INGRAM (M.), 1962

The bacteriology of meat-curing brines.

In "Recent Advances in Food Science", 2, 272-284, Hawthorn (J.) and Leitch (M.), London

- 51 - INSTITUT TECHNIQUE DU GRUYERE, 1973

Le salage de l'Emmental.

Bulletin de mai 1973

- 52 - IRVINE (O.R.), JARDINE (R.H.), 1973

Ontario Cheddar cheese composition study points out need for careful control.

Modern Dairy, july/august 1973

- 53 - JACQUET (J.), VILLETTE (O.), DELACROIX (J.), GONDOUIN (M.), DESFLEURS (M.), 1955

Considérations sur l'action du pH dans la croissance des moisissures utilisées pour la fabrication du Camembert, rôle du sel.

Bull. Soc. Linn. Normandie, 1-18

- 54 - JAGO (G.R.), 1974
Control of the bitter flavour defect in cheese.
Austral. J. Dairy Technol., 29, 2, 94-96
- 55 - JAKUBOWSKI (J.), REPS (A.), 1964
Beitrag zur kenntnis des Salzabsorptions - Vermögen von Käse.
Milchwissenschaft, 19, 8, 413-417
- 56 - JAKUBOWSKI (J.), REPS (A.), 1966
Die durch des Salzen hervorgerufene Migration von Wasser
und Mineralstoffen im Käse.
17ème Congr. Int. de Lait, D2, 365-372
- 57 - JAKUBOWSKI (J.), 1968
Untersuchungen über die Kinetik der Diffusion von Salz im
Käse.
Milchwissenschaft, 23, 5, 282-287
- 58 - JAYNES (J.A.), PFLUG (I.J.), HARMON (L.G.), 1961
Effect of pH and brine concentration on gas production
by a putrefactive anaerobe (PA 3679) in a processed cheese
spread.
J. Dairy Sci., 44, 2, 1265-1271
- 59 - JOST (W.), 1960
Diffusion in solids, liquids, gases.
3ème éd., Academic Press Inc. Publishers, New-York
- 60 - JULSKJAER (O.), 1966
Chemical composition of three Danish cheese types at
different ages.
17ème Congr. Int. de Lait., D2, 357-360
- 61 - KARLIKANOVA (S.M.), GUDKOV (A.V.), 1970
Influence de la teneur en sel, eau et des levains producteurs
de nisine sur la fermentation butyrique dans le fromage.
18ème Congr. Int. de Lait., 1F, 385
- 62 - KEILLING (J.), 1968
La qualité des fromages à pâte cuite : le vieillissement
des saumures dans les fromageries de Gruyère et d'Emmental.
Technique Laitière, 580, 12

- 63 - KERIMOV (G.), 1951
The reason for blue discoloration of salted cheese.
Anal. : Dairy Sci., Abstr., 12, 4, 405
- 64 - KERIMOV (G.), 1962
Maintenance of optimal acidity in brine. An important factor for improving the quality of brine cheese.
16ème Congr. Int. de Lait., B, 701-704
- 65 - KIERMEIER (F.), SCHATTENFROH (G.), 1958
Modellversuche zum Randweichwerden von Käsen.
Z. Lebensmitt. Untersuch., 108, 2, 143-151
- 66 - KIEFERLE (F.), SONNLEITNER (F.), 1935
La technique du salage à sec dans la fabrication du Camembert.
I - Principes physiques et chimiques.
Anal. : Lait, 15, 142, 203-204
- 67 - KIEFERLE (F.), SEYRER-REINDL (E.), 1953
Beiträge zur Kenntnis des Fettgehaltes i.T. der Käse.
Deutsche Molk. Ztg., 74, 43, 1467-1469
- 68 - KIKUCHI (T.), 1966
Observations on Camembert cheese ripening.
17ème Congr. Int. de Lait., D2, 213-319
- 69 - KIKUCHI (T.), TAKAFUJI (S.), 1971
Studies on the micro-organisms of Camembert cheese.
III - Effect of NaCl on the microflora of Camembert cheese.
Japan J. Zootechn. Sci. 42, 6, 268-275
- 70 - KIKUCHI (T.), TAKAFUJI (S.), 1971
Studies on the micro-organisms of Camembert cheese.
IV - Effect of NaCl on the ripening of Camembert cheese.
Japan J. Zootechn. Sci., 42, 6, 276-280
- 71 - KIRCHMEIER (O.), 1972
Gelstruktur und Salzaufnahme.
Deutsche Molk.-Ztg., 93, 37, 1638-1641

- 72 - KLIMSCHA (V.), 1970
Zeitgemasse Möglichkeiten zur Einrichtung von Salzbädern.
Deutsche Molk.-Ztg., 91, 48, 2232-2235
- 73 - KNEZ (V.), 1951
Distribution of salt in "Niva" cheese during ripening.
Anal. : Dairy Sci. Abstr., 13, 3, 271
- 74 - KOESTLER (G.), WEGMULLER (E.), 1927
Le salage du fromage avec du sel contenant de l'iode.
Anal. : Lait, 7, 68, 781-782
- 75 - KOESTLER (G.), 1943
Zur Kenntnis der Magerkäsefabrikation mit besonderer
Berücksichtigung verschiedener Methoden des Salzens.
Schweiz. Milchztg., 69, 13, 65-68
- 76 - KONINKLIJKE NEDERLANDSE ZUIVELBOND FNZ, 1973
Pekelen van kaas. (Le saumurage du fromage).
Rapport van de Werkgroep pekelen, 22, 49 p
- 77 - KUNDRAT (W.), 1951
Bakterienentwicklung und Reifungsbedingungen beim
Camembert-Käse.
Deutsche Molk. - Zeitung., 72, 36, 1122-1124
- 78 - KURMANN (J.A.), 1964
Le contrôle du bain de sel de fromagerie.
Lait. Romand, 16, 22
- 79 - KYURKCHYAN (V.N.), 1963
The effect of substances other than salt in the brine on
the composition and properties of cheese.
Anal. : Dairy Sci. Abstr., 25, 4, 145, abstr. 1023
- 80 - LACRAMPE (J.L.), HARDY (J.), RAMET (J.P.), WEBER (F.), 1971
Contribution à l'étude de l'évolution chimique et du
traitement des saumures de fromagerie.
Lait, 51, 503/504, 158-175

- 81 - LANE (C.B.), HAMMER (B.W.), 1940
Effect of salting of blue cheese curd.
J. Dairy Sci., 23, 2, 169-172
- 82 - LANGEVELD (L.M.), ELGERSMA (R.H.), 1973
Zwarte vlekken op Kaas. (Coloration brune des fromages).
Off. Org. K. ned Zuivelbond, 65, 22, 544,545
- 83 - LENOIR (J.), CHOISY (C.), 1971
Aptitude de l'espèce *Penicillium caseicolum* à la production
d'enzymes protéolytiques.
Lait, 51, 503/504, 138-157
- 84 - LENOIR (J.), GLENZA (A.), BERGERE (J.L.), CERF (O.), CHOISY (C.),
DESMAZEAUD (M.), HERMIER (J.), 1973
Les facteurs de production du système protéolytique de
Penicillium caseicolum.
Lait, 53, 525-526, 246-279
- 85 - LINDEN (G.), 1971
Applications de la spectrophotométrie d'absorption atomique
dans les laboratoires d'industrie alimentaire.
Ind. Alim. Agric., 88, 6, 793-803
- 86 - MAIR-WALDBURG (H.), HEINRICH (C.), 1966
Zum Kochsalzgehalt des Emmentalers.
Deutsche Molk.-Ztg., 87, 1142-1147
- 87 - MAIR-WALDBURG (H.), HEFELE (B.), 1970
Fragen zur Rolle des Kochsalzgehaltes im Käse.
Deutsche Molk.-Ztg., 91, 51/52, 2410-2411
- 88 - MAIR-WALDBURG (H.), 1974
Handbuch der Käse.
Volkswirtschaftlicher Verlag GmbH, Kempten (Allgäu)
- 89 - MALOUCHKO (V.), 1957
Influence exercée par le sel sur le développement de la
microflore dans le fromage.
Technique Laitière, 13, 232-13-21
- 90 - MANSOUR (A.), 1972
Etude biochimique et microbiologique du fromage affiné en
saumure.
Thèse de Docteur-Ingénieur. Université de Nancy I,
14 décembre 1972, CNRS A 07327

- 91 - MARQUARDT (J.C.), 1942
Le salage du fromage.
Anal. : Lait, 22, 217/218, 259
- 92 - MARTLEY (F.G.), LAWRENCE (R.C.), 1972
Cheddar cheese flavour. II. Characteristics of single strain starters associated with good or poor flavour development.
New-Zeal. J., Dairy Sci. Technol., 7, 2, 38-44
- 94 - MASSON (A.), 1959
Contribution à l'étude de l'amélioration des sels de fromagerie.
Bull. Soc. Sci. Nancy, 4
- 95 - Mc DOWALL (F.H.), WHELAN (L.A.), 1934
La distribution du sel dans le fromage Cheddar.
Anal. : Lait, 14, 140, 1102-1103
- 96 - Mc DOWALL (F.H.), DOLBY (R.M.), 1936
Studies on the chemistry of Cheddar cheese making.
J. Dairy Res., 7, 2, 156-175
- 97 - MENDEZ (R.), 1958
Etude de l'action du sel sur le développement de *Penicillium candidum*.
Bull. Soc. Sci. Nancy, 2, 1-39
- 98 - MINARIK (R.), DOLEZALEK (J.), 1973
Vliv některých technologických faktorů na průběh solení a jakost eidamských sýrů. (Effet de quelques facteurs technologiques sur le salage et la qualité de l'Edam).
Průmysl. Potravin. 24, 5, 141-145
- 99 - MOCQUOT (G.), 1947
Etude sur l'eau liée des fromages.
Lait, 27, 269/270, 576-595
- 100 - MORRIS (T.A.), 1961
Observations on the salting of the Cheddar and Gouda cheese.
Austral. J. Dairy Technol., 16, 1, 31-32

- 101 - MORRIS (T.A.), Mc KENZIE (I.J.), 1970
 La fabrication du fromage persillé : le salage en saumure pour remplacer le salage par saupoudrage.
 18ème Congr. Int. de Lait., 1F, 392
- 102 - MULDER (H.), MONIB (A.), 1962
 The condition of the calcium p. caseinate phosphate in cheese.
 16ème Congr. Int. de Lait., B, 539-544
- 103 - OEHEN (V.), 1969
 Kommen "Salzsiebli" und "Salzbürste" zu neuen Ehren ?
 Schweiz. Milchztg., 95, 8, 56
- 104 - OEHEN (V.), SCHILLING (P.), KESSLER (W.), 1971
 Die Pflege des Salzbadens verdient auch in der Hartkäseerei vermehrte Beachtung.
 Schweiz. Milchztg., 97, 20, 164
- 105 - OLSANSKY (C.), MINARIK (R.), ROJIKOVA (L.), 1966
 Vliv obsahu soli na jakost emmentenských.
 (Influence du taux de sel sur la qualité de l'Emmental).
 Průmysl Potravin, 17, 544-547
- 106 - PEDERSEN (D.H.), VEDAMUTHU (E.R.), REINBOLD (G.W.), WASHAM (C.J.), 1971
 Effect of some manufacturing variables on the leakage defect of Blue cheese.
 J. Dairy Sci., 54, 2, 1615-1621
- 107 - PETERSEN (N.), 1947
 Das Salzen der Käse.
 Die Molk.-Ztg., Hildesheim, 5, 16, 59-60
- 108 - PETTINAU (M.), 1971
 Diffusion of NaCl during dry salting or brining of Pecorino Romano cheese.
 Anal. : Dairy Sci. Abstr., 33, 3, 242, abstr. 1619
- 109 - PHELAN (J.A.), GUINEY (J.), FOX (P.F.), 1973
 Proteolysis of β -casein in Cheddar cheese.
 J. Dairy Res., 40, 1, 105-112

- 110 - POSTHUMUS (G.), 1951
 Beschouwingen over kaaspel.
 (Observations sur le salage du fromage).
 Off. Org. K. ned Zuivelw., 43, 49, 612-614
- 111 - RAADSVELD (C.W.), 1952
 Verloop van de rijping in Edammer kazen met verschillende
 vochtgehalten end verschillende zout concentraties.
 (Phénomènes d'affinage dans les fromages du type Edam avec
 différents taux d'humidité et différentes concentrations
 en sel).
 Neth. Milk. Dairy J., 6, 4, 342-355
- 112 - RAMANAUSKAS (R.), 1971
 Effect of acidity on exchange of components between
 cheese and brine.
 Anal. : Dairy Sci. Abstr., 33, 6, 342, abstr. 2784
- 113 - RAMANAUSKAS (R.), BUTKUS (K.), ANTANAVICIUS (A.), BUTKIENE (U.)
 PESECKAS (D.), 1973
 The effect of salt on physicochemical and biochemical
 transformations in Dutch cheese.
 Scient. Rep. Lithuan. Br. All. Union Res. Inst. of But.
 and Cheese Ind., URSS, 7, 217-229
- 114 - RAMSAY (A.A.), 1932
 Le sel employé en laiterie.
 Lait, 12, 113, 217-218
- 115 - REINBOLD (G.W.), HAMMOND (E.G.), 1974
 An improved method for brine salting cheese.
 J. Dairy Sci., 57, 10, 1254-1256
- 116 - RIDDETT (W.), VALENTINE (G.M.), Mc DOWALL (F.H.), WHELAN (L.A.),
 1935
 Effet du sel sur la qualité du Cheddar.
 Anal. : Lait, 15, 144, 411
- 117 - ROEDER (J.), 1953
 Vom Käsesalzen
 Deutsche MolK.-Ztg., 74, 49, 1655-1656

- 118 - ROYO-LIRA (R.), 1969
 Estudio preliminar sobre la influencia de los factores, concentration, pH y temperatura de la salmuera y tiempo de permanencia en ella en el proceso de salado de los quesos tipo "Chanco" y "Reggianito".
 Anal. : Milchwissenschaft, 24, 2, 113
- 119 - SCHULZ (M.E.), 1947
 Das Auskeimen von Konidien des *Penicillium camemberti candidum*.
 Milchwissenschaft, 2, 2, 117-128
- 120 - SCHULZ (M.E.), 1950
 Salzäder.
 Süddt. Molk.-Ztg., 71, 23, 819-821
- 121 - SCHULZ (M.E.), KAY (H.), 1956
 Auswertung von Käse-Analysen für die Camembert und Brie-Käse-Herstellung.
 Deutsche Molk.-Ztg., 77, 40, 1385-1387
- 122 - SCHULZ (M.E.), KAY (H.), MROWETZ (G.), NAGEL (O.), 1963
 Versuche zur Verhinderung des Spättriebs im Tilsiterkäse durch kombiniertes Salzen im Käsebruch und im Salzbad.
 Kieler Milchwirtschaft. Forsch. Ber., 15, 2, 113-149
- 123 - SCHWARZ (G.), 1946
 Der Gehalt an Kochsalzfreier Asche in der fettfreien Trockenmasse von Roh- und Schmelzkäse.
 Süddt. Molk.-Ztg., 4, 16, 1-8
- 124 - SCOTT (J.K.), 1954
 Moisture losses in Cheddar cheese under curing.
 J. Dairy Res., 21, 2, 212-228
- 125 - SOLLBERGER (H.), 1975
 Beeinflussung der Narbenbeschaffenheit von Emmentalerkäse durch den Calciumgehalt des Salzbadens.
 Schweiz. Milchztg., 101, 8, 47

- 126 - SOLVAY & Cie
Etude générale des problèmes concernant la fabrication de saumure saturée à partir du sel fin.
Communication personnelle.
- 127 - STADHOUDERS (J.), LANGEVELD (L.P.), 1966
The microflora of the surface of cheese. Factors affecting its composition.
17ème Congr. Int. de Lait., D2, 577-584
- 128 - STADHOUDERS (J.), HUP (G.), HASSING (F.), 1974
Lactobacillen in "slappe" kaaspesel.
(Lactobacilles dans les saumures diluées).
Off. Org. K.ned Zuivelb., 66, 49, 1170- 1173
- 129 - STATENS FORSØGMEJERI-HILLERØD, 1966
Hurtigmetoder til electrometrisk saltbestemmelse.
(Méthode potentiométrique de dosage du sel).
Pub. 161
- 130 - STRAND (A.H.), BYRE (O.), YSTGAARD (O.M.), 1966
Brine salting of Jarlsberg cheese immediatly after pressing.
17ème Congr. Int. de Lait., D1, 155-160
- 131 - SUTHERLAND (B.J.), 1974
Control of salt absorption and whey drainage in Cheddar cheese manufacture.
Austral. J. Dairy Technol., 29, 2, 86-93
- 132 - SWIATEK (A.), JAWORSKI (J.), 1959
Histochemische untersuchungen über die Verteilung von Mineralsalzen im Käse.
15ème Congr. Int. de Lait., 3, 5 a 40, 1509-1517
- 133 - SWIATEK (A.), POZNANSKI (S.), 1959
Einfluss des Kochsalzgehaltes auf die Bildung von Schwefelwasserstoff im Trappistenkäse.
15ème Congr. Int. de Lait., 3, 5 a 37, 1487-1493
- 134 - THAKUR (M.K.), KIRK (J.R.), HEDRICK (T.I.), 1975
Changes during ripening of unsalted Cheddar cheese.
J. Dairy Sci., 58, 2, 175-181

- 135 - TOMKA (G.), SZAKALY (S.), 1970
Influence du salage sur la qualité du fromage bleu.
18ème Congr. Int. de Lait., 1F, 393
- 136 - VAANDRAGER (G.), 1974
Die aansuur vir pekel in Goudakaas.
(Le pH de la saumure utilisé pour saler le Gouda).
S.-Afr. J. Dairy Technol., 4, 1, 73-75
- 137 - VASLIN (M.P.), 1925
Le salage des Camemberts en bain de saumure.
Lait, 5, 42, 113-116
- 138 - VEILLET (A.), 1960
Recherches sur l'amélioration du sel de fromagerie effectuées
à l'Ecole de Laiterie de Nancy.
Bull. Soc., Sci, Nancy, 6, 2-16
- 139 - VIARD (M.), 1964
A propos du salage en saumure des pâtes molles.
Technicien du Lait, 197, 5-14
- 140 - VIARD (M.), DEVEAU (J.), 1972
Epuración química et stérilisation microbiologique
par traitement des saumures utilisées dans l'industrie
alimentaire et en particulier dans l'industrie fromagère.
Lait, 52, 511/512, 21-27
- 141 - VRIES de (E.), 1971
Het bereiden van nieuwe kaaspekkel.
(Préparation des saumures).
Off. Org. K. nedZuivelb., 63, 49, 1166
- 142 - VUJICIC (I.F.), 1959
Change of mineral matter content in Kachkawal cheese
during the salting.
Anns. Sci. Work Fac. Agric. Novi-Sad, 3, 1-7
- 143 - VUJICIC (I.F.), 1962
The effect of the size and form in salting Kachkawal cheese.
J. Sci. Agric. Res. Beograd, 15, 49, 3-14

- 144 - VUJICIC (I.F.), 1962
Intensity of salt diffusion in Kachkawal cheese.
Anns. Sci., Work Fac., Agric. Novi-Sad, 6, 1-11
- 145 - VUJICIC (I.F.), 1963
A study on the relationship between the factors influencing
the time of cheese salting.
Milchwissenschaft, 18, 6, 282-284
- 146 - VUJICIC (I.F.), 1964
Effect of some factors on Kachkawal cheese salting.
Anns. Sci. Work Fac. Agric. Novi-Sad, 8, 1-13
- 147 - VUJICIC (I.F.), 1967
Effect of the structure of Kachkawal cheese body on some
its physical properties.
Anns. Sci. Work Fac. Agric. Novi-Sad, 11, 173-180
- 148 - WEBER (F.)
Travaux non publiés.
- 149 - WILLART (S.), SJOSTROM (G.), 1959
The influence of sodium chloride upon the hydrolysis of
milk-fat in cheese.
15ème Congr. Int. de Lait., 3, 1481
- 150 - ZIVKOVIC (Z.), 1964
Chemical changes in brine during the ripening of soft
white cheese.
Anal. : Dairy Sci. Abstr., 26, 6, 287, abstr. 1773
- 151 - ZONJI (D.), 1969
Untersuchungen zur Gesetzmässigkeit der Salzdifffusion
im Käse Während des Salzens.
Milchwissenschaft, 24, 2, 80-83
- 152 - ZONJI (D.), 1971
Beitrag zur Problematik des Salzens von Käse im Salzbad.
Milchwissenschaft, 26, 12, 745-747

VI - ADDITIF ET ANNEXES

A D D I T I F

BIBLIOGRAPHIE

- 93 - MASSON (A.), 1958
Etude de l'action du pH et du sel sur le développement
du *Penicillium glaucum*.
Bull. Soc. Sci. Nancy, 3, 95-112

ANNEXE 1

VALEURS NUMERIQUES DE LA FONCTION D'ERREUR $y = \text{erf}(x)$

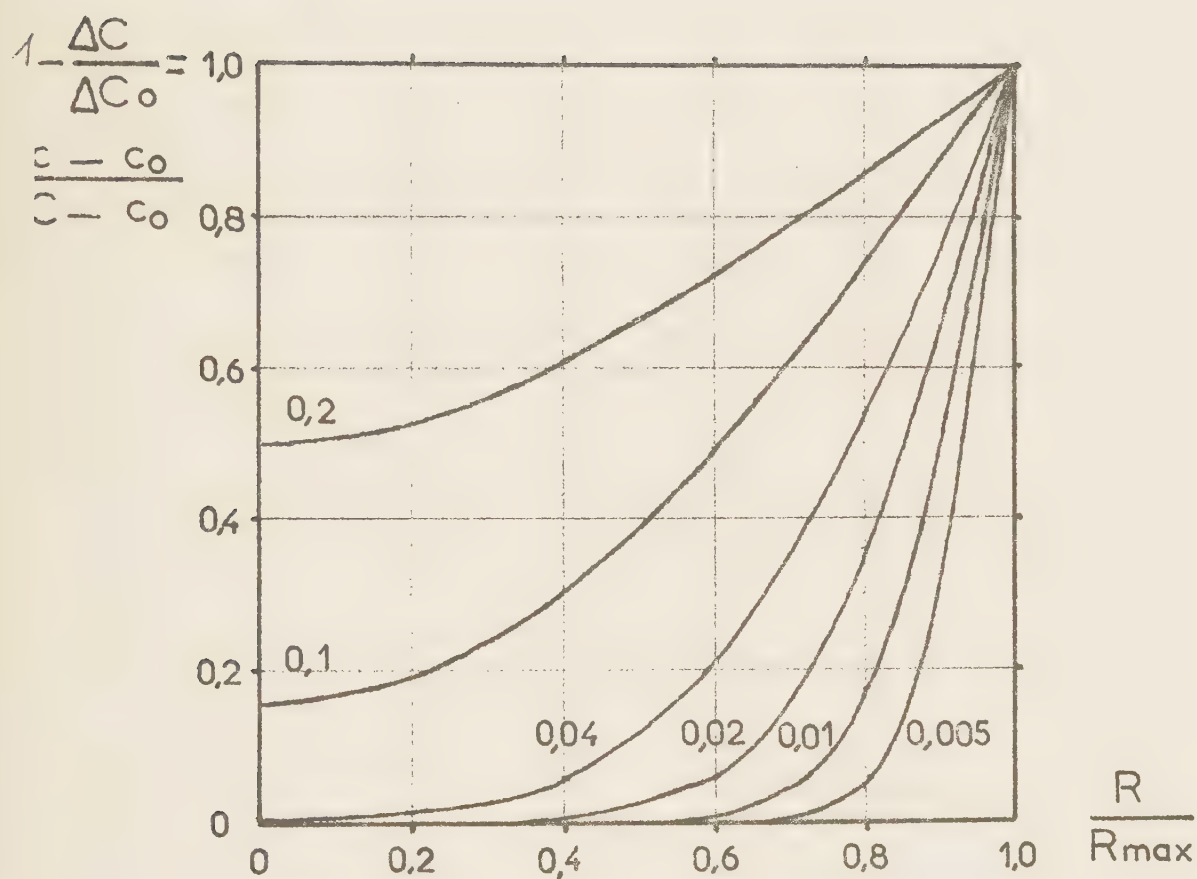
(d'après CRANK (20))

x	y	x	y	x	y
0	0	0,70	0,6778	1,80	0,9890
0,05	0,0563	0,75	0,7111	1,90	0,9927
0,1	0,1124	0,80	0,7421	2,00	0,9953
0,15	0,1679	0,85	0,7706	2,10	0,9970
0,2	0,2227	0,90	0,7969	2,20	0,9981
0,25	0,2763	0,95	0,8208	2,30	0,9988
0,30	0,3286	1,00	0,8427	2,40	0,9993
0,35	0,3793	1,10	0,8802	2,50	0,9995
0,40	0,4283	1,20	0,9103	2,60	0,9997
0,45	0,4754	1,30	0,9340	2,70	0,9998
0,50	0,5205	1,40	0,9522	2,80	0,9999
0,55	0,5633	1,50	0,9661	2,90	0,9999
0,60	0,6038	1,60	0,9763	3,00	0,9999
0,65	0,6420	1,70	0,9837		

Annexe 2 - Diffusion dans un cylindre : distribution des concentrations.

137

(d'après CRANK (20))



Les nombres sous les courbes sont les valeurs de $D_h \cdot t / R_{\max}^2$

NOM DE L'ETUDIANT : HARDY JOEL

NATURE DE LA THESE : THESE DE DOCTEUR INGENIEUR

VU, APPROUVE

& PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le 16/3/1976

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I



